



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

BROUŠENÍ LOŽISKOVÝCH KROUŽKŮ

GRINDING OF BEARING RINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

DANIEL RŮŽIČKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MILAN KALIVODA

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Daniel Růžička

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Broušení ložiskových kroužků

v anglickém jazyce:

Grinding of Bearing Rings

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod do obrábění ložisek.
2. Brousicí operace na vytipovaných 3 strojích.
3. Měření nabroušených ploch u sortimentu ložisek.
4. Rozbor naměřených hodnot.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení.
6. Diskuze.
7. Závěr.

Cíle bakalářské práce:

Vyhodnocení jakosti broušených ploch pro potřebu firmy. Formulování technologických opatření.

Seznam odborné literatury:

1. MASLOV, J. N. Teorie broušení kovů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1979. 248 s.
2. SUCHY, Ivana. Handbook of die design. 2nd edition. New York: MCGRAW-HILL, 2006. P. 730. ISBN 0-07-146271-6.
3. HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. 1. vyd. Praha: MM publishing, s. r. o., 2008. 240 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
4. Příručka obrábění, kniha pro praktiky. 1. vyd. Praha: Sandvik CZ, s. r. o. a Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. ISBN 91-972299-4-6.
5. MÁDL, Jan et al. Jakost obráběných povrchů. 1. vyd. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 180 s. ISBN 80-7044-639-4.
6. KARPÍŠEK, Zdeněk. Matematika IV: Statistika a pravděpodobnost. 3. vyd. Olomučany: CERM, s. r. o., 2007. 170 s. ISBN 978-80-241-3380-9.
7. PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. Strojírenská metrologie II. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 180 s. ISBN 80-214-3338-8.
8. LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky. 3. vyd. Úvaly: ALBRA, 2006. 914 s. ISBN 80-7361-033-7.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Milan Kalivoda

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 21.11.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Hlavním cílem této práce je vyhodnocení jakosti povrchu, obrobeného na třech různých bruskách (rozdílné stáří brusek), a tím porovnání kvality samotných brusek. Porovnány jsou dosažené stupně přesnosti naměřených geometrických tolerancí vnitřních oběžných drah vnějších ložiskových kroužků. Jako nejkvalitnější bruska je výsledně označena nejnovější (typu CNC), nicméně druhá v pořadí (i druhá nejmladší) je jí svojí kvalitou velmi blízko a závěrem je uvedeno, že je její nákup i provoz výhodnější.

Klíčová slova

broušení, ložiskový kroužek, jakost povrchu, metrologie, bruska, stupeň přesnosti

ABSTRACT

The main objective of this work is to evaluate the surface quality, machined on three different grinders (all three from different age), and to compare those grinders. Comparison is done by the achieved degree of precision of measured geometric tolerances in inner orbits of the outer bearing rings. As the best grinder is expressly marked the newest (type CNC) however, the second in a row (the second youngest) is very close to its quality and finally it is noted that the purchase and operation of this grinder is more convenient.

Key words

grinding, bearing ring, surface quality, metrology, grinder, degree of accuracy

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RŮŽIČKA, D. *Broušení ložiskových kroužků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 34 s. 7 příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Kalivoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Broušení ložiskových kroužků** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Daniel Růžička

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu práce panu Ing. Milanu Kalivodovi z VUT v Brně za odbornou pomoc při vypracovávání této práce.

Dále děkuji panu Milanu Bartošovi z metrologického oddělení a pánům Ing. Martinu Hegerovi a Ing. Pavlu Koudelovi, vedoucím výroby z firmy SLB spol. s r. o. za cenné připomínky, rady a příjemné zázemí v této firmě, při provádění měření.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 ÚVOD DO OBRÁBĚNÍ LOŽISEK	10
1.1 Konstrukce a fyzikální význam ložiska	10
1.2 Výroba ložisek	11
1.2.1 Broušení	11
2 BROUSICÍ OPERACE NA VYTIPOVANÝCH 3 STROJÍCH	13
2.1 Broušené kroužky	13
2.2 Brusky	13
2.2.1 BDU 80	13
2.2.2 BDU 250 A	14
2.2.3 BDA 300	15
3 MĚŘENÍ NABROUŠENÝCH PLOCH U SORTIMENTU LOŽISEK.....	17
3.1 Kruhovitost – tvar plochy	17
3.2 Průměrná aritmetická úchylka profilu povrchu – Ra.....	20
3.3 Příčný profil	22
3.4 Průměr díry	23
4 ROZBOR NAMĚŘENÝCH HODNOT	25
4.1 Kruhovitost – tvar plochy	25
4.2 Průměrná aritmetická úchylka profilu povrchu – Ra.....	25
4.3 Příčný profil	26
4.4 Průměr díry	26
4.5 Konečný rozbor.....	26
5 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	27
5.1 Přehled výstupních veličin.....	27
5.2 Zhodnocení výstupních veličin	28
6 DISKUZE	29
6.1 Hodnocení z hlediska autora.....	29
6.2 Hodnocení z hlediska firmy SLB spol. s r. o.	29
6.3 Hodnocení z hlediska světové situace	29
6.4 Návrhy na pokračování řešení	29

FSI VUT	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	List	8
---------	------------------	------	---

ZÁVĚR.....	30
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	31
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	33
SEZNAM PŘÍLOH.....	34

ÚVOD

K sepsání díla o této specifické problematice autora vedl zejména zájem o výrobní technologie, podpořený kvalitním zázemím v rodinné firmě zabývající se navrhováním a výrobou speciálních ložisek SLB spol. s r. o. Konkrétní téma vzniklo po konzultaci s vedoucími zaměstnanci technologického oddělení této společnosti, kteří projevíli zájem o podobný „průzkum“, jenž jim pomůže vyhodnotit efektivnost jednotlivých strojů (celkově jsou srovnány 3 brusky), a také samozřejmě s vedoucím této práce panem Ing. Milanem Kalivodou. Cílem této práce je tedy vyhodnotit kvalitu broušení tří různých brusek (vychází se z předpokladu, že brusíči se snaží o co možná nejlepší kvalitu broušeného povrchu (obr. 0), což je podpořeno tím, že brusíči jsou pouze dva a podle zkušeností dosahují velmi vyrovnaných kvalit), což je zkoumáno obrobením a následným měřením vnitřních oběžných drah vnějších ložiskových kroužků válečkových ložisek. Na úvod je popsán proces broušení zejména z důvodu jeho významnosti v oboru výroby ložisek a také hlavně proto, že vyhodnocovanými stroji jsou brusky. Dále jsou pečlivě popsány procesy měření geometrických vlastností těchto povrchů, přičemž z přiložených tabulek výsledků měření není jasné patrné, který povrch má lepší vlastnosti. To je způsobeno tím, že bohužel nebylo možné brousit na všech bruskách stejný typ ložiskového kroužku, a proto v následující kapitole je proveden přepočít na hodnoty stupňů přesnosti, které se již porovnat mohou. Na konec je tedy provedeno srovnání a vyvození závěru.



Obr. 0 Zaměstnanec firmy SLB spol. s r. o. Jan Bednář při práci na brusce BDU 80.

1 ÚVOD DO OBRÁBĚNÍ LOŽISEK

Tato kapitola je věnována obecnému vysvětlení základních vlastností a principů výroby ložisek. V první podkapitole bude tedy popsáno ložisko jako takové včetně jeho rozdělení podle specifických vlastností a dále druhá podkapitola popíše samotný výrobní proces se zaměřením na ložiskové kroužky.

1.1 Konstrukce a fyzikální význam ložiska

Ložiska mají neotřesitelný význam v podstatě ve všech sférách běžného života. Jejich princip spočívá v přenosu energie (pohybové) při minimálních ztrátách třením. Vývoj ložisek započal již v období vynalezení kola a stále zdokonalování je na denním pořádku i dnes, zapříčiněné zejména novými druhy maziv, zlepšováním fyzikálních vlastností materiálů a převratnými konstrukčními provedeními [1, 2].

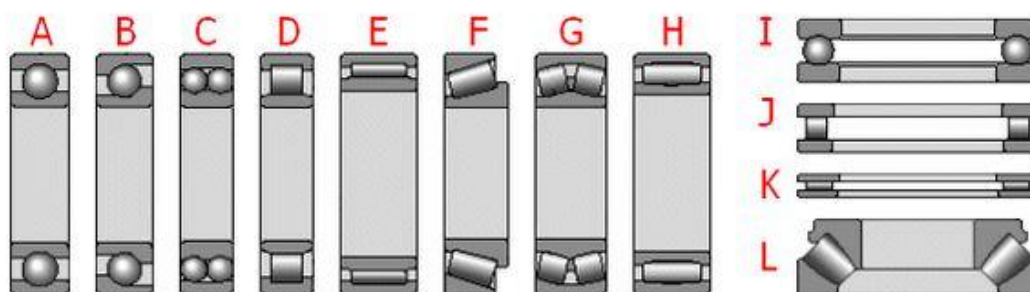
Asi nejrozšířenější skupinou ložisek jsou ložiska valivá, a jelikož měřené vnější kroužky jsou pro valivá ložiska, bude právě tato skupina pečlivěji popsána [1, 2].

Valivá ložiska umožňují vzájemný rotační pohyb součástí ve strojích, přičemž současně přenášejí působící síly. Obvykle se skládají ze dvou kroužků (vnitřní a vnější), valivých těles a klece (i když klec někdy zcela chybí). Velice významnou součástí valivých ložisek jsou maziva a různé těsnicí prvky, které jsou nezbytné pro správnou funkci a je proto důležité navrhnout nejen správně typ a velikost ložiska, ale také způsob jeho mazání, protikorozi ochrany, odvodu vznikajícího tepla a zabránění vnikání nečistot [1, 2].

Valivá ložiska jsou zpravidla rozdělena podle směru síly, pro jejíž přenášení jsou převážně určena, do dvou základních skupin: ložiska **radiální** a **axiální**. Toto rozdělení ale není zcela přesně specifikovatelné, protože většina radiálních ložisek může zachytávat i axiální síly a naopak některé typy axiálních ložisek síly radiální. Přesný význam to ovšem má pro stanovení únosností ložisek [1, 2].

Valivá ložiska se dělí podle tvaru valivých těles na ložiska **kuličková**, **válečková**, **soudečková**, **kuželíková** a **jehlová**, přičemž kuličková ložiska se označují jako ložiska s bodovým stykem a všechna ostatní jako ložiska s přímkovým, nebo čárovým stykem [1, 2].

Jednotlivé typy ložisek jsou znázorněny na obr. 1.1.



Obr. 1.1 Typy valivých ložisek [3]. a) kuličkové, b) kuličkové s kosoúhlým stykem, c) naklápěcí kuličkové, d) válečkové, e) jehlové, f) kuželíkové, g) soudečkové, h) toroidní, i) axiální kuličkové, j) axiální válečkové, k) axiální jehlové, l) axiální soudečkové.

1.2 Výroba ložisek

Naprosto nejvýznamnějším procesem při obrábění ložisek je **broušení**. Dalšími využívanými procesy jsou samozřejmě: řezání (spočívá v nařezání kovové trubky) a různé druhy hrubého obrábění (soustružení nebo frézování). Broušení je sice až dokončovací operace (i když v dnešní době to již není pravidlem), ale jak již bylo popsáno, konkrétně pro výrobu ložisek je to operace dozajista nejdůležitější, a proto bude důkladněji popsána [4].

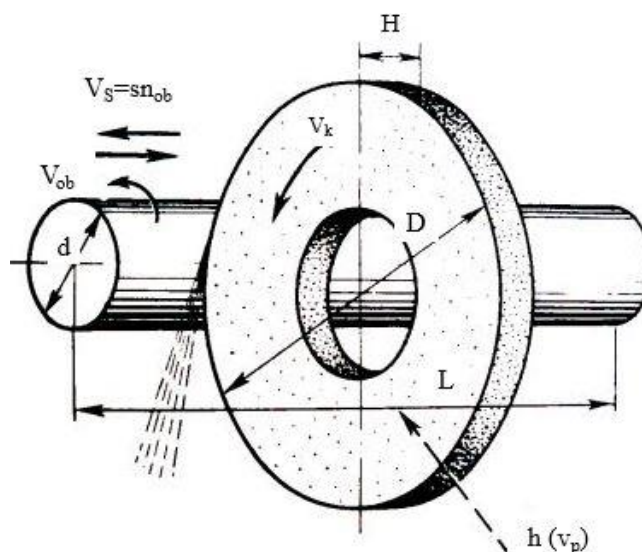
1.2.1 Broušení

Broušení spadá do skupiny abrazivních metod obrábění, lze ho tedy charakterizovat jako obrábění mnohobřitým nástrojem vytvořeným ze zrn brusiva, která jsou spojena pojivem. Jedná se o jednu z nejstarších metod obrábění a v současné době je využíváno jako hlavní metoda dokončovacího obrábění, přičemž brusky tvoří ve výrobě valivých ložisek až 60% všech obráběcích strojů [4].

Hlavní charakteristické znaky broušení jsou:

1. vysoká produktivita určená velikostí plochy obrobku, opracované za časovou jednotku; produktivita se ovšem nevyznačuje pouze zvětšováním řezné rychlosti a obráběním velkých ploch, ale i zkracováním doby nezbytné k upnutí a sejmutí obrobku,
2. velká geometrická přesnost tvaru obrobených ploch (proto je to jedna z hlavních dokončovacích operací),
3. vysoká přesnost obrobených rozměrů v mezích od 2 do 3 μm i méně,
4. vysoká kvalita povrchu – hodnota průměrné aritmetické úchytky profilu broušené plochy (R_a) je řádově v desetinách μm ,
5. vysoká kvalita povrchové vrstvy obrobku s minimálním stavem napjatosti jeho materiálu,
6. možnost obrábění velmi tvrdých materiálů, protože zrna brusiva nástroje jsou velmi tvrdá a tepelně odolná,
7. velké měrné řezné síly (odpory), řádově až několik desítek tisíc MPa (souvisejí s malým průřezem třísek,
8. velké množství vzniklého tepla a z toho vyplývající nutnost vydatného chlazení obrobku,
9. nepravidelný úběr třísky jednotlivými zrny brusiva v důsledku různé geometrické formy zrn a nepravidelnosti jejich rozmístění v nástroji [4, 5].

Názorná ukázka broušení bude představena na základním způsobu broušení, a to broušení vnějších válcových ploch do kulata s posuvem podél osy obrobku (obr. 1.2). Konkrétně pro broušení ložiskových kroužků (rotační povrch) se využívá právě **broušení do kulata**, jak vnějšího, tak vnitřního [5].



Obr. 1.2 Schéma broušení vnějších válcových ploch s posuvem podél osy obrobku [5].

Legenda k obrázku 1.2, kde:

D [mm]	- průměr brousicího kotouče,
H [mm]	- šířka brousicího kotouče,
L [mm]	- délka broušené plochy obrobku,
d [mm]	- průměr obrobku,
$h(v_p)$ [mm.min ⁻¹]	- přisuv,
v_k [m.s ⁻¹]	- obvodová rychlost brousicího kotouče,
v_{ob} [m.min ⁻¹]	- obvodová rychlost obrobku,
v_s [mm.min ⁻¹]	- podélný posuv [5].

Tvoření třísky při broušení je v podstatě obdobné jako při jiných druzích obrábění, a tak je vhodné uvést zvláštnosti vlastní právě pro brousicí proces, které se liší od ostatních druhů obrábění:

1. nepravidelné rozmístění velkého počtu malých zrn brusiva na pracovní ploše kotouče,
2. brousicí kotouč nemá souvislý břit,
3. různá výška zrn brusiva u kotouče,
4. určitá závislost mezi tloušťkou a šířkou vrstvy materiálu odebírané jednotlivými zrny brusiva,
5. zrna brusiva mají nepravidelný tvar a zaoblené vrcholy, které obvykle mají záporný úhel čela,
6. řezné elementární částice – zrna – mají velkou tvrdost, tepelnou odolnost, jsou křehká, ostrá a štěpí se v průběhu broušení [4, 5].

2 BROUSICÍ OPERACE NA VYTIPOVANÝCH 3 STROJÍCH

Nyní se přejde k popsání skutečných obráběcích strojů a samotnému broušení povrchů ložiskových kroužků.

S pomocí pracovníků firmy SLB spol. s r. o. byly vybrány 3 podobné brousicí stroje (brusky), které jsou běžně využívány a významným rozdílem mezi nimi je jejich stáří, z čehož samozřejmě plyne, že by měla být rozdílná i jejich produktivita a kvalita obrobků. Přičemž kvalita obrobků z jednotlivých strojů je přesně to, čemu bude nadále věnována pozornost.

Konkrétně jde o stroje:

1. BDU 80 (konvenční, rok výroby: 1986),
2. BDU 250 A (NC, rok výroby: 1994, účelná oprava: 2009),
3. BDA 300 (CNC, rok výroby: 2003).

Logický je předpoklad, že čím novější stroj, tím kvalitnější broušený povrch. Nicméně, nikdy se tomuto výzkumu ve firmě SLB spol. s r. o. nevěnovali a jelikož nejmodernější stroj je typu CNC (Computer Numeric Control), prostřední je typu NC (Numeric Control) a nejstarší je ovládaný klasicky, je otázkou, zda se zručný pracovník na starším stroji dokáže kvalitou broušeného povrchu vyrovnat moderní počítačem řízené brusce.

2.1 Broušené kroužky

Samotné brousicí operace budou sestávat z broušení vnitřních povrchů ložiskových kroužků, přičemž bohužel není možné do pracovního plánu zařadit totožné ložiskové kroužky, které by se obrobily na těchto třech strojích, tudíž kroužky se trochu **liší**. To znamená, že při následném měření a porovnání nebude možné vycházet přímo z naměřených údajů, ale budou se muset porovnávat dosažené **třídy přesnosti (IT)**, které vzejdou přepočtem.

Dále je uvedeno, jaké kroužky budou soustruženy na konkrétních bruskách (tab. 2.1).

Tab. 2.1 Přiřazení kroužků k jednotlivým bruskám.

rozměr \ bruska	BDU 80	BDU 250 A	BDA 300
jmenovitý průměr díry [mm]	21,004	40,005	99,015
jmenovitá délka díry [mm]	17	26	30

2.2 Brusky

Jak již bylo zmíněno, některé z brusek jsou velmi staré, ta nejstarší byla dokonce vyrobena před téměř třiceti lety, avšak díky pečlivé administrativní práci firmy SLB spol. s r. o., nebylo potíží získat veškerou dokumentaci použitých strojů. V následujících podkapitolách jsou obecně popsány všechny 3 použité brusky.

2.2.1 BDU 80

Tato bruska je ze všech tří naprosto nejstarší (rok výroby 1986) a je to znát i z jejího vzhledu (obr. 2.1). Stále funguje, ale zejména vzhledem ke svému stáří a tím i jejím omezeným

možnostem, se již moc nevyužívá (omezující vlastností je zejména velmi malé rozmezí obráběných průměrů). Je proto také jedním z cílů této práce zhodnocení její přesnosti a stanovení závěru, zdali je tato bruska ještě postačující nebo je-li již nutné ji z aktivního provozu vyřadit [6].

Jedná se o univerzální brusku na vnitřní broušení, která je určena pro přesné broušení válcových a kuželových otvorů v rozsahu 3 – 120 mm v kusové a malosériové výrobě. Dlouhé výrobky je možno brousit v podpěře. Ovládání stroje a výměna obrobku je ruční. Tento stroj může pracovat i v automatickém cyklu [6].

Technický popis brusky BDU 80 je v příloze 1.



Obr. 2.1 Bruska BDU 80.

2.2.2 BDU 250 A

Poněkud novější bruska z roku 1994, která ovšem prošla účelovou opravou v roce 2009. Při této opravě bylo měněno téměř vše (hlavně se přidalo číslíkové ovládání – NC) a tento stroj podle vyjádření zaměstnanců pracuje lépe než některé modernější typy [7].

Tato univerzální bruska na vnitřní broušení je určena pro přesné broušení válcových a kuželových otvorů v kusové a malosériové výrobě, přičemž dlouhé obrobky je možno brousit v podpěře. Její přestavitelný brusný vřeteník je uložen na oscilujícím podélném stole a přísuv do řezu je prováděn ručně nebo v automatickém cyklu [7].

Vzhled stroje je na obr. 2.2 a technický popis je umístěn v příloze 2.



Obr. 2.2 Bruska BDU 250 A.

2.2.3 BDA 300

Tato bruska je ze všech tří testovaných nejnovější a nejmodernější. Pochází z roku 2003 a je jako jediná typu CNC (computer numeric control). To znamená, že obrobky na ní obrobené by měly dosahovat lepších parametrů a její produktivita by měla být vyšší (pokud nepůjde o čistě kusovou výrobu) [8].

Je určena pro přesné broušení válcových a kuželových otvorů. Zároveň je možno u válcových otvorů brousit přilehlá čela. Po přetočení natáčivého nosníku o 90° je možno brousit kruhovou dráhu axiálních ložisek [8].

Pracovní cyklus je poloautomatický, obsluha zadává potřebná vstupní data příslušné operace. Vkládání obrobků je ruční. Broušení otvorů probíhá pomocí řemenového brusného vřetena. Tato vřetena jsou výměnná v držáku brusného vřetene. Vlastní broušení probíhá pomocí oscilace osy Z a přísunu osy X [8].

Stroj je vybaven inprocesovým měřidlem, které průběžně vyhodnocuje rozměr broušeného otvoru. Upínání obrobků je pomocí elektromagnetické upínací desky pólových nástavců a opěrek. Celý pracovní prostor je zakrytován [8].

Vzhled stroje je na obr. 2.3 a technický popis je umístěn v příloze 3.



Obr. 2.3 Zakrytovaná bruska BDA 300.

3 MĚŘENÍ NABROUŠENÝCH PLOCH U SORTIMENTU LOŽISEK

Měření nabroušených ploch je stěžejní částí této práce i kvůli tomu, že zabere nejvíce času.

Pro každý typ kroužku, tedy z obrobků od každé brusky bude měřeno 10 ks, což znamená, že celkově bude 30 měřených kroužků. Tento statistický soubor je dostatečně velký na to, aby se zamezilo znehodnocení výsledků vlivem ojedinělých nepřesností v jakostech obráběných povrchů, způsobených například chvilkovou indispozicí brusiče.

Veškerá měření budou prováděna autorem, v laboratoři k tomu určené, v areálu firmy SLB spol. s r. o., samozřejmě pod dohledem kvalifikovaného zaměstnance (metrologa) této společnosti.

U všech typů ložiskových kroužků se tedy budou měřit geometrické vlastnosti jejich vnitřních oběžných drah. Konkrétně jsou to:

1. kruhovitost,
2. průměrná aritmetická úchylka profilu povrchu (dále též R_a),
3. příčný profil,
4. průměr díry.

Tyto vlastnosti daných povrchů byly pečlivě vybrány za účelem kvalitního a reprezentativního srovnání výsledků měření.

Kompletní dokumentace výsledků měření kruhovitosti a příčného profilu je umístěna v **příloze 4, 5 a 6** (roztříděno podle použitých brusek: **4 – BDU 80, 5 – BDU 250 A, 6 – BDA 300**). Při měření hodnoty R_a a průměru díry se jako výsledné zapisují přímo konkrétní hodnoty do tabulek, proto k těmto měřením dokumentace neexistuje.

Při měření jsou použity zjednodušené měřicí metody, zejména z důvodu pouze informativního měření.

3.1 Kruhovitost – tvar plochy

Obecně se dá kruhovitost charakterizovat jako vztah mezi kruhovitým tvarem profilu skutečné rotační plochy obrobku a mezi ideální kružnicí. Číselné vyjádření kruhovitosti jako geometrické vlastnosti profilu obrobku je vyjádřeno jako toleranční pole, které je v dané rovině průřezu omezeno **dvěma soustřednými kružnicemi**, vzdálenými od sebe o šířku mezikruží, rovnou právě toleranci kruhovitosti (obr. 3.3). Hodnocením kruhovitosti se zabývá norma **ČSN ISO 4291** [9, 15, 16, 18].

Pro hodnocení kruhovitosti je tedy potřeba získat profil rotačního objektu v rovině kolmé na jeho osu a tento profil porovnávat s kružnicemi, jejichž poloha je určena podle pravidel níže [9, 15, 18].

Poloha kružnic je určena metodou **MZC** (kružnice nejmenšího pásma). Tato metoda spočívá v zakreslení dvou soustředných kružnic do vykresleného profilu povrchu tak, že jedna kružnice je opsaná a druhá vepsaná, přičemž obě kružnice se musejí křivky znázorňující profil povrchu dotýkat alespoň ve dvou bodech – pokud možno naproti sobě (obr. 3.4) [9, 15, 18].

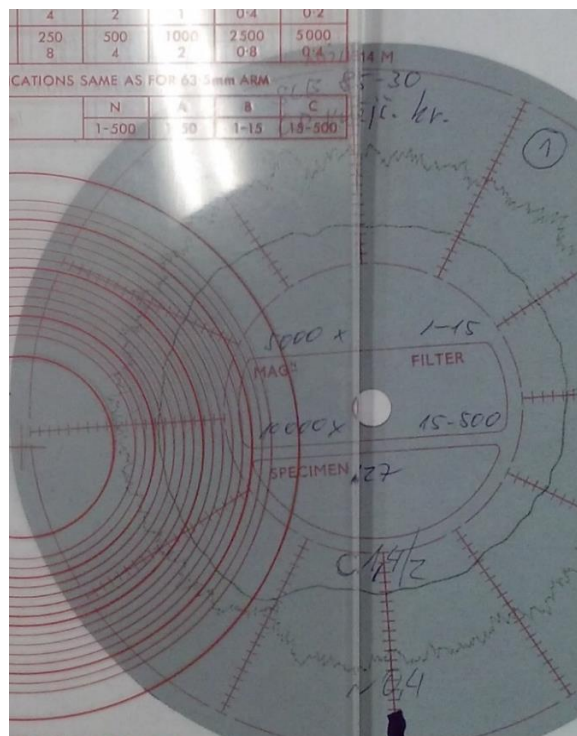
Měření kruhovitosti je prováděno na přístroji Talyrond 3 od výrobce Taylor – Hobson (obr. 3.1 a obr. 3.5).

Postup měření:

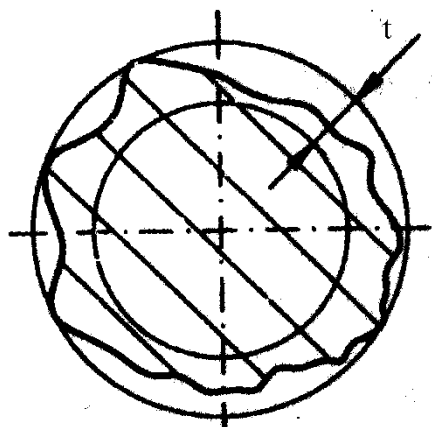
1. řádné očištění dosedací plochy kroužku a jeho vnitřní oběžné dráhy,
2. upnutí kroužku na podložku, spuštění snímače přibližně do poloviny oběžné dráhy kroužku, najetí na dotyk k povrchu a jeho upevnění zámkem,
3. zapnutí vyhodnocovacího přístroje (obr. 3.5) a nastavení parametrů měření. Filtr na 1-15 (mezní hodnoty vln po obvodu 1 – 15 upr), zvětšení na x5000 (toto zvětšení je ideální pro vyhodnocení kruhovitosti) a délka ramena stylusu na 127 mm (protože je použit stylus s délkou ramena 127mm). Ovšem při nastavování zvětšení na x5000 je potřeba jít postupně a při jednotlivých mírách zvětšení stále přesněji a přesněji vystřed'ovat upnutý kroužek pomocí rysky umístěné na obr. 3.5 vlevo dole,
4. zapnutí rotace snímače uvnitř kroužku, vložení kruhového papíru do zapisovače a spuštění zapisovače,
5. vyjmutí listu kruhového papíru, na kterém jsou v polárním diagramu znázorněna data potřebná k hodnocení kruhovitosti (obr. 3.2) a vypnutí rotace snímače,
6. pomocí skleněné destičky se znázorněnými referenčními kružnicemi (obr. 3.2) se metodou MZC (kružnice nejmenšího pásma) zjistí rozdíl mezi poloměrem vnější a vnitřní kružnice, z čehož se při uvážení zvětšení získá kruhovitost [9, 18].



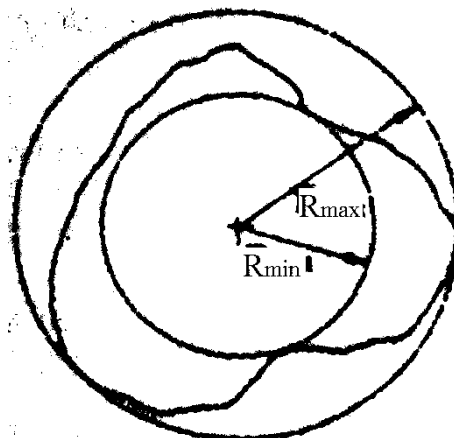
Obr. 3.1 Talyrond 3 při měření kruhovitosti.



Obr. 3.2 Měření kruhovitosti pomocí skleněné destičky s referenčními kružnicemi. Na vyhodnocovacím papíru vpravo lze vidět křivku kruhovitosti (poměrně souvislá vnitřní čára).



Obr. 3.3 Toleranční pole kruhovitosti, kde t udává šířku mezikruží [16].



Obr. 3.4 Referenční kružnice pro hodnocení kruhovitosti metodou MZC, kde R udává malý a velký průměr [9].



Obr. 3.5 Vyhodnocovací přístroj firmy Taylor – Hobson. Nastavení filtru se provádí přepínačem nejvíce vlevo uprostřed; nastavení zvětšení přepínačem druhým zleva, přičemž aktuální hodnota se zobrazuje pomocí svítící diody výše; nastavení délky ramena stylusu pomocí druhého přepínače zprava; tisk výsledků měření do polárního diagramu je prováděn vlevo dole (tisk výsledků měření příčného profilu je vpravo dole).

Výsledné hodnoty kruhovitosti jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Tab. 3.1 Výsledné hodnoty kruhovitosti v μm .

stroj \ kroužek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
BDU 80	0,4	0,3	0,3	0,3	0,6	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4
BDU 250 A	1,4	1	1,1	1,2	1	0,9	1,15	1,35	1	1,3
BDA 300	1,2	1,4	1,2	1,1	1,2	1,2	1	1,3	1,3	1,2

3.2 Průměrná aritmetická úchylka profilu povrchu – R_a

Veličina R_a je parametrem **drsnosti povrchu**, která spolu s **vlnitostí povrchu** a **základním profilem** tvoří **strukturu povrchu**. Toto rozdělení je definováno normou **ČSN EN ISO 4287**. Pro vyhodnocení parametru R_a se tedy ze struktury povrchu získá **profil povrchu**, z něhož se pomocí přístroje (použitím filtru profilu λ_c) odvodí **profil drsnosti** (obr. 3.6) [10, 16, 19].

Hodnota R_a se určuje jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky (obr. 3.6), přičemž střední čára profilu drsnosti je čára odpovídající dlouhovlnné složce profilu potlačené filtrem profilu λ_c . Značí se **R_a** a její výpočet se provádí podle vztahu (3.1) [10, 19].

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (3.1)$$

kde: R_a [μm] - průměrná aritmetická úchylka profilu povrchu,
 $Z(x)$ [-] - pořadnice – výšková hodnota všech bodů x ,
 l_r [μm] - základní délka pro profil drsnosti je číselně rovna vlnové délce profilového filtru λ_c [10, 19].

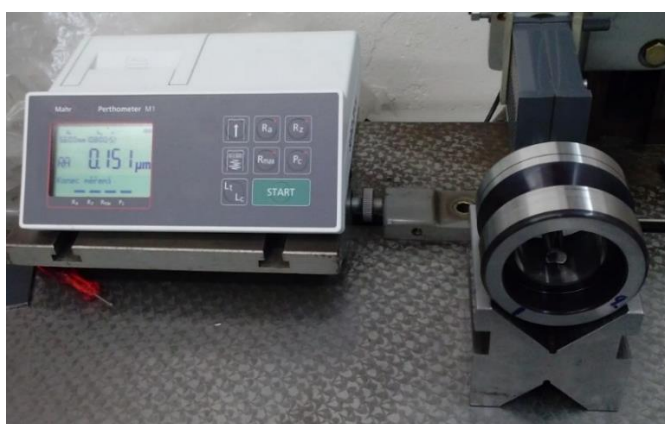
Pro měření je využíván stroj **Perthometer M1** od společnosti **Mahr** (viz obr. 3.7), který umožňuje přímo zvolit měření parametru **R_a** , tudíž odpadá jakékoliv manuální počítání.

Postup spočívá pouze v umístění dokonale očištěného kroužku pod měřicí hlavici (obr. 3.8), přitlačení hrotu (který je umístěn ve zmiňované hlavici) na povrch a spuštění měření, přičemž přístroj má již nadefinované filtry ($\lambda_c = 0,800$) a délku pojezdu měřicího ramena ($l = 5,600$ mm). Toto nastavení odpovídá požadavkům normy **ČSN EN ISO 4288**, která definuje základní délky drsnosti pro měření R_a a odpovídající parametry pro neperiodické profily (např. broušené povrchy). Tato norma udává pro $0,1 < R_a < 2$ [μm] základní délku drsnosti **$l_r = 0,8$ mm** (tedy $\lambda_c = 0,8$) a vyhodnocovanou délku drsnosti **$l_n = 4$ mm** (tab. 3.2). Délka pojezdu měřicího ramena $l = 5,6$ mm je o dvě základní délky delší než vyhodnocovaná délka, z důvodu započítání rozběhu a doběhu snímače [19, 20].

Ještě je důležité zmínit, že parametr R_a se měří ve směru osy kroužku. Konkrétně u tohoto parametru se ale uvádí, že hodnoty naměřené ve směru osy a ve směru kolmém na osu (po oběžné dráze) jsou zaměnitelné [16].



Obr. 3.6 Znázornění významu parametru R_a , kde s značí střední čaru profilu drsnosti [10, 19].



Obr. 3.7 Měřicí zařízení Perthometer M1 společnosti Mahr.



Obr. 3.8 Hrot pro měření R_a na zařízení Perthometer M1.

Tab. 3.2 Základní délky drsnosti pro měření R_a a odpovídající parametry pro neperiodické profily (např. broušené profily) [9, 20].

R_a	základní délka drsnosti l_r	vyhodnocovaná délka drsnosti l_n
$[\mu\text{m}]$	$[\text{mm}]$	$[\text{mm}]$
$0,006 < R_a \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < R_a \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < R_a \leq 2$	0,8	4
$2 < R_a \leq 10$	2,5	12,5
$10 < R_a \leq 80$	8	40

Výsledné hodnoty R_a jsou uvedeny v tabulce 3.3.

Tab. 3.3 Výsledné hodnoty R_a v μm .

stroj \ kroužek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
BDU 80	0,24	0,24	0,24	0,245	0,248	0,225	0,217	0,23	0,248	0,249
BDU 250 A	0,16	0,17	0,17	0,18	0,15	0,17	0,13	0,14	0,15	0,17
BDA 300	0,25	0,25	0,25	0,23	0,24	0,24	0,23	0,22	0,24	0,22

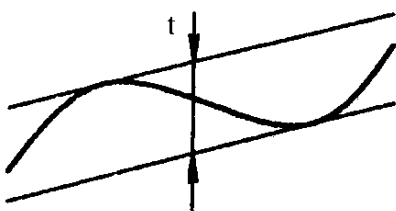
3.3 Příčný profil

Je to vlastně tolerance tvaru – přímosti. V tomto případě se měření provádí ve směru osy díry po celé délce díry. Používá se na to stejný stroj jako pro měření kruhovitosti, a to Talyrond 3 (obr. 3.1). K vykreslení profilu se používá opět vyhodnocovací přístroj firmy Taylor – Hobson (obr. 3.5), pouze s několika odlišnostmi v nastavení [16].

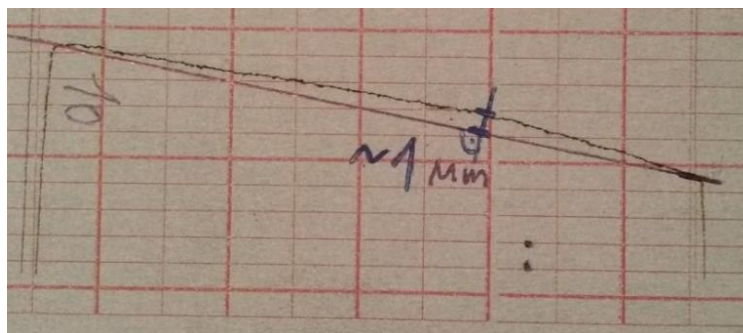
Toleranční pole přímosti je omezeno **dvěma rovnoběžnými přímkami** ve vyznačeném směru vzdálenými od sebe o hodnotu tolerance přímosti. Znázornění tolerančního pole přímosti je na obrázku 3.9. Geometrickou toleranci přímosti popisuje norma **ČSN EN ISO 12780**, která sestává ze dvou částí [9, 16, 21, 22].

Postup měření:

1. řádné očištění dosedací plochy kroužku a jeho vnitřní oběžné dráhy,
2. upnutí kroužku na podložku, spuštění snímače až na konec oběžné dráhy, najetí na dotyk k povrchu a jeho upevnění zámkem,
3. zapnutí vyhodnocovacího přístroje (obr. 3.5) a nastavení parametrů měření, filtr na 1 - 500 upr (je to nejmenší možné nastavení filtru, které nejméně zkreslí zkoumaný profil a nastavuje se tak proto, že snímač vevnitř kroužku nekoná rotační pohyb, ale pouze přímočarý ve směru od podložky k hornímu okraji kroužku a filtrace není potřebná), zvětšení – u BDU 250A na x2000, u BDA 300 na 2000x a u BDU 80 na 1000x (čistě podle velikosti kroužku), délka ramena stylusu na 127 mm,
4. zapnutí posuvu snímače uvnitř kroužku ve směru osy díry (směrem vzhůru ven z díry) a zároveň spuštění zapisovače,
5. vyjmutí listu papíru, na kterém je znázorněna křivka příčného profilu, potřebná k hodnocení úchylky přímosti (obr. 3.10), a vypnutí posuvu snímače,
6. pomocí pravítka se spojí dva nejvzdálenější konce křivky znázorňující příčný profil povrchu přímkou a odečte se vzdálenost rovnoběžek mezi přímkou a na ni nejvzdálenějším bodem křivky (obr. 3.10), z velikosti této vzdálenosti se určí daná úchylka.



Obr. 3.9 Toleranční pole přímosti křivky v rovině, kde t udává vzdálenost rovnoběžných přímek [16].



Obr. 3.10 Měření úchylky přímosti daného povrchu.

Na obrázku 3.10 lze vidět, že přímka spojující dva konce křivky příčného profilu je mírně nakloněná. To není způsobeno nepřesným obrobením, ale pouze nepatrnou křivostí podlahy nebo dosedací podložky stroje, což má na samotné měření zanedbatelný vliv.

Výsledné hodnoty úchytky přímosti jsou uvedeny v tabulce 3.4.

Tab. 3.4 Výsledné hodnoty úchytky přímosti v μm .

stroj \ kroužek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
BDU 80	0,75	1	1	0,5	0,5	0,75	0,25	0,75	0,5	0,25
BDU 250 A	1	1	0,5	1	1	0,5	1	0,75	1	1
BDA 300	0,9	1,1	1	1	0,9	0,9	1	1	1,2	0,9

3.4 Průměr díry

Odchylky od jmenovitého průměru jsou měřeny na **univerzálním horizontálním délkoměru** firmy **CARLZEISS JENNA** (obr. 3.11) pracujícím na principu Abbeho délkoměru. Zejména je důležité dávat pozor na to, aby doteky měřidla byly opravdu umístěny ve dvou nejvzdálenějších bodech dané díry (v inflexních bodech).

Postup měření je vcelku jednoduchý a začíná u stanovení přesné míry pomocí etalonu, který je rozměrově nejbližší měřenému rozměru. Dále se okolo senzorů měřidla umístí měřená díra. Pomocí nalezení inflexních bodů a posléze samotného měření kukátkem, v němž se pohybují rysky při otáčení kotoučů, je možné určit odchylku od jmenovitého průměru díry (obr. 3.11) [10].

Samotné měření se provádí dvakrát. A to tak, že se měří průměr vždy ve dvou na sebe kolmých úhlopříčkách, načež se z výsledků vypočítá aritmetický průměr (vztah 4.1). Z důvodu velkého počtu měření a tudíž i hodnot, jsou v tabulce 3.5 uvedeny již zprůměrované hodnoty. Tyto výsledky jsou uvedeny v **absolutní hodnotě**, protože je důležitá zejména velikost úchytky od jmenovitého průměru, a to zejména proto, že kladné a záporné hodnoty by při počítání aritmetického průměru vedly k chybě, ta je korigována právě užitím absolutních hodnot [10].



Obr. 3.11 Měření odchylky od jmenovitého průměru díry ložiskového kroužku na univerzálním horizontálním délkoměru firmy CARL ZEISS JENNA.

Tab. 3.5 Výsledné hodnoty odchylky od jmenovitého průměru v μm .

stroj \ kroužek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
BDU 80	+3	+2	+3	+3	+4	+3	+3	+2	+2	+1
BDU 250 A	+0	+2	+4	+3	+2	+1	+0	+0	+0	+2
BDA 300	+0	+4	+3	+3	+1	+3	+0	+1	+2	+0

4 ROZBOR NAMĚŘENÝCH HODNOT

V této kapitole je přistoupeno ke statistické části této práce. Ta spočívá v porovnání výsledků jednotlivých měření a snaze co možná nejnázorněji poukázat na rozdíly v přesnosti výroby jednotlivých strojů – statistické vyhodnocení souboru naměřených hodnot z předchozí kapitoly.

Pozn.: Nebude ovšem vyhodnoceno v každé kategorii všech 30 výsledků, ale určí se vždy průměrná hodnota dané tolerance pro daný stroj (tab. 4.1) pomocí vztahu (4.1).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

Ve vztahu 4.1 se vyskytují parametry, kde:

- n - počet hodnot,
- \bar{x} - aritmetický průměr [11].

Tab. 4.1 Průměrné hodnoty daných tolerancí v μm .

stroj \ tolerance	kruhovitost	Ra	příčný profil	průměr díry
BDU 80	0,37	0,238	0,625	+2,6
BDU 250 A	1,14	0,16	0,9	+1,4
BDA 300	1,21	0,24	0,99	+1,7

Tyto hodnoty jsou uvedeny s přesností mnohdy přesahující rozlišitelnost použitých měřidel, a to pouze z důvodu snazšího informativního porovnání dosažených výsledků (přesnější převod na stupně přesnosti).

Výsledky uvedené v tabulce 4.1 nelze přímo porovnat, v následujících podkapitolách je proto vysvětleno, jak se tyto hodnoty přepočítají na již zmíněné stupně přesnosti, které porovnat jdou, přičemž veškeré **výsledné stupně přesnosti** jsou uvedeny v **tabulce 4.2**, která je zobrazuje tak, jak se budou porovnávat.

4.1 Kruhovitost – tvar plochy

Kruhovitost je standartní geometrická tolerance, jejíž hodnota je velmi závislá na rozměrech obráběného povrchu. Nebudou tedy rovnou porovnány naměřené hodnoty (tab. 4.1), nýbrž tyto hodnoty se přepočtou na stupně přesnosti (základní tolerance IT) vždy pro konkrétní rozměr ložiskového kroužku s použitím hodnot z tab. 2.1 [12, 14].

Převedení je provedeno pomocí tabulky tolerancí kruhovitosti a válcovitosti (viz **příloha 7** – tabulky pro přepočet naměřených hodnot na stupně přesnosti) v normě **ČSN 01 4405**, nalezením nejbližší hodnoty úchyly pro daný jmenovitý rozměr [12, 14].

4.2 Průměrná aritmetická úchylna profilu povrchu – Ra

Hodnota Ra je opět závislá na jmenovitém průměru díry, stejně jako u kruhovitosti i zde platí, že čím je obrobek rozměrnější, tím musí být těžší obrobit jeho plochu dostatečně kvalitně [10, 15].

Při porovnání je znovu využito stupňů přesnosti (IT), odpovídající normy **ČSN 01 4451**, jmenovitých rozměrů (tab. 2.1) a naměřených hodnot (tab. 4.1) [16, 17].

Naneštěstí tato norma již **není v platnosti**, nicméně neexistuje norma, která ji nahrazuje, a proto bude tabulka v této normě uvedená (viz **příloha 7** – tabulky pro přepočet naměřených hodnot na stupně přesnosti), využita. V této části práce je důležité pouze porovnání a nikoliv stanovení přesných hodnot pro následnou výrobu, není tedy problém využít pouze informativní hodnotu této tabulky [17].

Další problém vyvstal se samotnou konstrukcí dané tabulky, která uvádí hodnoty Ra pouze od IT 5 výše. Je zde ovšem uvedeno, že hodnoty jsou matematickou závislostí odvozeny z hodnot Ra uvedených pro IT 6, a proto bylo možné tabulku rozšířit (viz **příloha 7** – tabulky pro přepočet naměřených hodnot na stupně přesnosti) a použít, přičemž se k danému jmenovitému rozměru a hodnotě Ra přiřazuje vždy nejmenší dosažené IT [17].

4.3 Příčný profil

Je to vlastně tolerance tvaru – přímosti a její velikost je velmi závislá na rozměrech obráběného povrchu. Nebudou tedy rovnou porovnány naměřené hodnoty (tab. 4.1), nýbrž tyto hodnoty se přepočtou na stupně přesnosti (základní tolerance IT) vždy pro konkrétní rozměr ložiskového kroužku s použitím hodnot z tab. 2.1 [9, 12].

Převedení je provedeno pomocí tabulky tolerance přímosti a rovinnosti (viz **příloha 7** – tabulky pro přepočet naměřených hodnot na stupně přesnosti) v normě **ČSN 01 4405**, nalezením nejbližší hodnoty úchyly pro daný jmenovitý rozměr [12, 14].

4.4 Průměr díry

Jedná se o základní toleranci závislou na průměru. Použije se opět převedení na toleranční stupně [13, 16].

Převedení se provede pomocí tabulky Základní tolerance (viz **příloha 7** – tabulky pro přepočet naměřených hodnot na stupně přesnosti) v normě **ČSN EN 20286-1** (nahrazuje ČSN 01 4201), nalezením nejbližší hodnoty úchyly pro daný jmenovitý rozměr [13, 14].

4.5 Konečný rozbor

Zde jsou uvedeny veškeré hodnoty ve finální podobě v kontrast (tab. 4.2).

Tab. 4.2 Výsledné stupně přesnosti.

stroj \ tolerance	kruhovitost	Ra	příčný profil	průměr díry
BDU 80	IT 1	IT 3	IT 2	IT 2
BDU 250 A	IT 2	IT 2	IT 2	IT 1
BDA 300	IT 1	IT 1	IT 2	IT 0

5 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Předcházející kapitolou je kompletně zakončena výrobní a měřicí část této práce a nyní je přistoupeno k sumarizaci a v následujících kapitolách také k vyhodnocení výsledků.

Základem veškerého měření bylo 30 ložiskových kroužků (vnějších), přičemž každých 10 obrobených na rozdílné brusce. Prvních 10 kroužků na velice staré brusce BDU 80, dalších 10 na poněkud mladší, ještě k tomu zmodernizované NC brusce BDU 250 A a poslední desítka byla obrobena na poměrně nové CNC brusce BDA 300.

Jakost povrchů vnitřních oběžných drah všech těchto kroužků byla důsledně zkontrolována a proměřena prostřednictvím měření výčtu různých geometrických úchylek na metrologickém stanovišti firmy SLB spol. s r. o. a následně tabelována a porovnána.

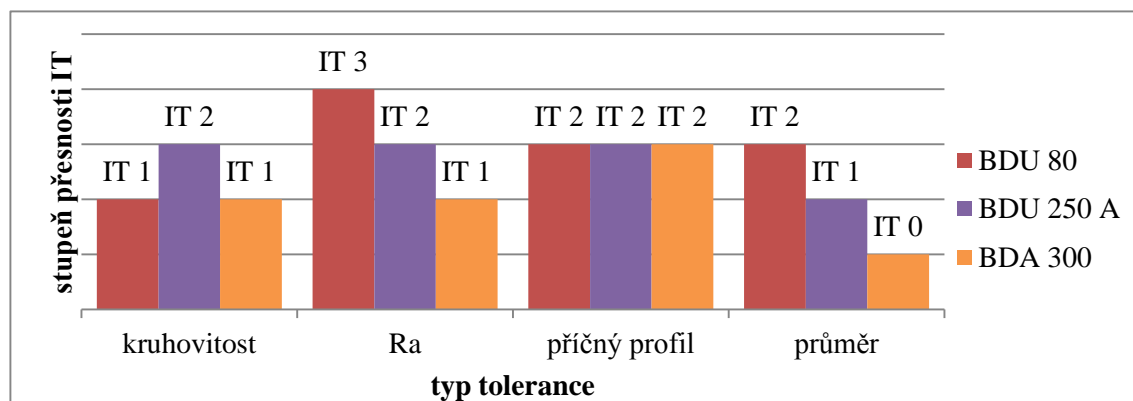
Konkrétně byly měřeny úchytky **kruhovitosti**, **parametru Ra**, **příčného profilu** a **jmenovitého průměru**. Tyto veličiny byly vybrány především na základě konzultace s odborným pracovníkem metrologického stanoviště firmy SLB spol. s r. o., přičemž je to výčet vlastností daných povrchů, který by měl posloužit k objektivnímu zhodnocení kvality brusek.

Velkou komplikací byl fakt, že ložiskové kroužky obrobené na jednotlivých bruskách nebyly stejného průměru a tudíž nebylo možné porovnávat jakost jejich povrchů pomocí přímo naměřených úchylek. Tato komplikace byla způsobena zejména vytížeností provozu této firmy. K porovnání naměřených úchylek bylo tedy přistoupeno jinak, a to přes stupně přesnosti IT, které jsou závislé právě na jmenovitých rozměrech.

Pomocí tabulek umístěných v technických normách, charakterizujících strukturu povrchu, tvar povrchu atd., bylo možné přepočítat veškeré naměřené úchytky na stupně přesnosti IT, které je možné mezi sebou porovnávat a tudíž vyhodnotit a porovnat kvalitu povrchu jednotlivých kroužků.

5.1 Přehled výstupních veličin

Následující graf (obr. 5.1) názorně porovnává průměry naměřených hodnot tolerancí ložiskových kroužků vyrobené na třech různých strojích a ukazuje také, z jakého stroje pocházejí nejlepší a nejhorší obrobky, přičemž srovnány jsou hodnoty převedené na stupně přesnosti.



Obr. 5.1 Srovnání stupňů přesnosti tolerancí kruhovitosti, parametru Ra, příčného profilu a průměru (čím menší je IT, tím vyšší je přesnost vzhledem ke jmenovitému rozměru).

5.2 Zhodnocení výstupních veličin

Z grafu na obrázku 5.1 je jednoznačně vidět, že původní domněnka o kvalitě brusek byla pravdivá a **nejlepších** výsledků dosahuje skutečně nejnovější bruska typu **CNC BDA 300**. Je ale překvapivé, jak dobrých výsledků dosahují i další dvě testované brusky. Při výrobě ložisek je samozřejmě kvalita broušených povrchů nesmírně důležitá, obvykle se ale nepředepisují dovolené úchytky menší než IT 3, a proto se nabízí otázka, zda je pro výrobu takovýchto ložisek potřeba dosahovat přesnosti IT 1 či dokonce IT 0, což by mohlo odpovídat nárokům např.: na ložiska pro jadernou elektrárnu.

Zpět k výslednému pořadí. Jako **nejméně kvalitní** se ukázala bruska nejstarší **BDU 80**, i přes velmi kvalitní výsledky z hlediska kruhovitosti a příčného profilu, které jsou vskutku překvapivé. Při porovnání zbylých dvou výsledků je jasné vidět, že kvalita broušeného povrchu je sice dostačující, ovšem zaostává za kvalitou povrchů broušených na novějších bruskách. Součástí špatného hodnocení této brusky je také zejména to, že u této brusky je velké **omezení v maximálním možném průměru broušeného otvoru (120 mm)**. Toto omezení má za následek nemožnost plného využití této brusky v provozu, jelikož kroužky s takto malým průměrem otvoru se neobrábějí moc často.

Jako **prostřední** se ukázala být zmodernizovaná bruska typu **NC BDU 250 A**, která dosáhla vysoké kvality broušeného povrchu (i když ne nejvyšší). Tato bruska má jisté výhody, které je potřeba zmínit. Předně není tak moc omezena **maximálním možným průměrem broušeného otvoru**, který je zde **250 mm (stejně jako u BDA 300)**, druhou hlavní výhodou je pořizovací cena, která by v dnešní době byla asi **tříkrát menší než u kvalitnější BDA 300**.

Z výsledků měření tedy vyplívá, že nejvyšší kvalita broušených povrchů pochází z brusky BDA 300.

Závěrečně je potřeba zmínit ještě jeden aspekt, který by souvisel s případným doporučením ke koupi nové brusky a to je potřebná kvalifikace obsluhy těchto strojů. Nejvyšší požadavky jsou na obsluhu brusky typu CNC BDA 300, která je ovládána pomocí vytvořeného programu, neboli skriptu (tento skript musí vytvořit obsluha stroje). Jednodušší je to s obsluhou brusky typu NC BDU 250 A a BDU 80, kde je vyžadována hlavně manuální zručnost pracovníka (díky přestavbě brusky BDU 250 A na typ NC je umožněno dosahovat vyšší kvality broušených povrchů než je tomu u klasické univerzální brusky BDU 80).

6 DISKUZE

6.1 Hodnocení z hlediska autora

Je samozřejmé, že celkové hodnocení všech testovaných brusek nelze přidělovat pouze na základě kvality broušícího procesu, ale také na všech okolnostech, které se týkají provozu těchto zařízení (viz kapitola 5.1). Těmi nejvýznamnějšími jsou právě pořizovací náklady a potřebná kvalifikace obsluhy stroje. Dále je vhodné podotknout, že všechny dosažené jakosti broušených povrchů splňují předepsané úchytky a je třeba se zamyslet nad tím, zda je potřeba dosahovat tak vysoké přesnosti, které dosahuje bruska BDA 300.

Co se týče finálního zhodnocení, nejlepší kvalita broušeného povrchu tedy pochází z brusky BDA 300 ale jako **nejlepší** (nejen z hlediska kvality broušeného povrchu, ale právě i z hlediska nákladů na pořízení a provoz) je nutno označit brusku **BDU 250 A**.

6.2 Hodnocení z hlediska firmy SLB spol. s r. o.

Firmou SLB spol. s r. o. bylo autorovi toto téma zadáno nejen pouze z informativního hlediska, ale také jako možný návrh, jak modernizovat broušící středisko. Místa v areálu této firmy není nazbyt a proto je potřeba zjistit, kterou brusku by bylo vhodné nahradit jakou bruskou modernější.

Podle toho, co je o této firmě známo, o zakázky nemá nouze a z grafu na obrázku 5.1 vyplývá, že mezi kvalitou broušených povrchů z brusek BDA 300 a BDU 250 A není příliš razantní rozdíl. Z tohoto a také dalších důvodů uvedených v kapitolách výše by závěrem této práce pro firmu SLB spol. s r. o. mělo být, odprodat historickou brusku BDU 80 (zejména kvůli omezení v maximálním možném průměru broušeného otvoru) a koupit brusku BDA 250 A (nebo jí podobnou), čímž by došlo k nárůstu kapacity na tomto stanovišti a tím i možnosti přijmout více zakázek.

6.3 Hodnocení z hlediska světové situace

Tato práce spadá do poměrně specifického oboru, broušení a hlavně jsou zde popsány konkrétně vybrané tři brusky, tudíž doslovné závěry jsou využitelné pouze pro zadávající firmu SLB spol. s r. o., nicméně ve světě existuje určitě velká spousta menších firem, které stojí před otázkou, jak modernizovat a zefektivňovat svoji výrobu a obecný závěr této práce použitelný skutečně je.

První důležitá informace je, jak vysoká je potřebná kvalita broušeného povrchu, ne vždy je totiž nejlepší kvalita zárukou nejlepší investice. Další podmínky jsou potom spíše individuální, ačkoliv některé zde zmíněny jsou, a to pořizovací náklady, náročnost obsluhy a omezení plynoucí z konkrétních strojů.

6.4 Návrhy na pokračování řešení

Pro budoucí pokračování je určitě možné otestovat a následně porovnat více brusek, což by přineslo ucelenější soubor informací, to skýtá ovšem jednu velkou komplikaci v podobě volby obsluhy brusek. Autorem testované brusky byly obsluhovány dvěma pracovníky firmy SLB spol. s r. o., kteří s těmito stroji mají dlouholetou praxi a jsou přibližně stejně zdatní. Při vyšším počtu testovaných brusek by ale mohlo být složité srovnat brusky a nějakým způsobem eliminovat rozdílnost v kvalitě obsluhy.

ZÁVĚR

Hlavní náplní této práce bylo porovnání kvality broušených povrchů pocházejících ze tří různých brusek a následné vyhodnocení, přičemž nejvíce prostoru je věnováno právě samotnému měření a popisu měřicích metod. Výsledkem těchto měření je graf na obrázku 5.1, ze kterého je patrné, že nejvyšší kvalita broušených povrchů pochází z nejmodernější brusky BDA 300, následně z BDU 250 A a v rámci porovnání nejméně kvalitní z brusky BDU 80, nicméně všechny naměřené úchytky nepřesáhly dovolené tolerance. Dále je uvedeno několik dalších kritérií, podle nichž je možné posuzovat jednotlivé brusky, kterými jsou například pořizovací náklady, provozní omezení stroje nebo potřebná kvalifikace obsluhy. Na základě výsledků v grafu na obr. 5.1 a zmíněných kritériích bylo možné vybrat brusku, která by nejlépe vyhovovala případným nárokům firmy SLB spol. s r. o. na modernizaci pracoviště. Vybranou brusku je BDU 250 A, která prošla modernizací na typ NC. Tato bruska dosahuje výborných jakostí broušených povrchů, oproti BDU 80 není omezena příliš malým maximálním průměrem broušeného otvoru a její cena je oproti brusce BDA 300 třetinová. Samozřejmě nedosahuje kvalit brusky BDA 300, nicméně tento rozdíl není příliš významný. Závěrem jsou uvedeny návrhy na pokračování řešení, ve kterých je zmíněno hlavně rozšíření sortimentu testovaných brusek a také zvětšení množství porovnávaných parametrů nejen z oblasti geometrických tolerancí, ale také z provozního hlediska – rozhodující jsou náklady a požadavky na kvalifikaci obsluhy stroje.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. PRO KONSTRUKTÉRY. 2012. ZKL [online]. [vid. 2015-02-02]. Dostupné z: <http://www.zkl.cz/cs/pro-konstruktery>.
2. E-LEARNING VUT: Konstruování strojů – strojní součásti (5KS 14/15Z). 2015. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ [online]. [vid. 2015-02-02]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/elearning/course/view.php?id=151304>.
3. Volba valivého ložiska. 2014. MITCalc [online]. [vid. 2015-05-08]. Dostupné z: http://www.mitcalc.cz/doc/help/cz/c_bearing_choice.htm.
4. Technologie obrábění: E_OPORY. 2012. Ústav strojírenské technologie [online]. [vid. 2015-02-02]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/dtb/eopory.php>.
5. MASLOV, J. N. Teorie broušení kovů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1979. 248 s.
6. ČZ STRAKONICE. BDU 80: UNIVERZÁLNÍ BRUSKA NA VNITŘNÍ BROUŠENÍ. 1986, 77 s.
7. ČZM – OBOROVÝ PODNIK – STRAKONICE. TECHNICKÝ POPIS A NÁVOD K OBSLUZE BDU 250 A: UNIVERZÁLNÍ BRUSKA NA VNITŘNÍ BROUŠENÍ. 1994, 43 s.
8. ČZ STROJÍRNA SPOL. S R.O. NÁVOD K POUŽÍVÁNÍ BDA 300. 2003.
9. PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. Strojírenská metrologie II. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 180 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-3338-8.
10. ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. Strojírenská metrologie I. Vyd. 5., V Akademickém nakl. CERM vyd. 3. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 183 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 978-80-214-4010-4.
11. KARPÍŠEK, Zdeněk. Matematika IV: Statistika a pravděpodobnost. 4. přeprac. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014, 171 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 978-80-214-4858-2.
12. ČSN 01 4405. Tolerance tvaru a polohy: Číselné hodnoty. Praha, 1979.
13. ČSN EN 20286-1. Soustava tolerancí a uložení ISO: Část 1: Základní ustanovení, úchytky a uložení. Praha, 1996.
14. Normy ČSN: Přesnost. VUT. Ústav Konstruování [online]. [vid. 2015-02-15]. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/index3327.html?akce=1&sekce=csn&ln=cs&zobraz_sekci=2.
15. MÁDL, Jan, Jan JERSÁK, František HOLEŠOVSKÝ, Václav KOUTNÝ a Vítězslav RÁZEK. Jakost obráběných povrchů. Vyd. 1. Ústí nad Labem: UJEP, ÚTRV, 2003, 179 s. ISBN 80-704-4539-4.
16. SVOBODA, Pavel, Brandejs JAN, Dvořáček JIŘÍ a FRANTIŠEK. Základy konstruování. Vyd. 4. Brno: CERM, 2011, 234 s. ISBN 978-80-7204-750-5.
17. ČSN ISO 468 (01 4451). Drsnost povrchu. Praha, 1993. [Neplatná].

18. ČSN ISO 4291. Metody hodnocení úchylek kruhovitosti. Měření změn poloměru. 1994.
19. ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu. 1999.
20. ČSN EN ISO 4288. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu. 1999.
21. ČSN EN ISO 12780 – 1. Geometrické specifikace produktu (GPS) - Přímost - Část 1: Slovník a parametry přímosti. 2012.
22. ČSN EN ISO 12870 – 2. Geometrické specifikace produktu (GPS) - Přímost - Část 2: Operátory specifikace. 2012.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
CNC	[-]	Computer Numeric Control – číslicové řízení počítačem
IT	[-]	stupeň přesnosti
MCC	[-]	zjišťování kruhovitosti pomocí metody nejmenší opsané kružnice
NC	[-]	Numeric Control – číslicové ovládání (bez počítače)
SLB spol. s r. o.	[-]	Speciální Ložiska Brno společnost s ručením omezeným
upr	[-]	undulation per revolution – počet vln na otáčku

Symbol	Jednotka	Popis
D	[mm]	velký průměr brousicího kotouče
H	[mm]	šířka brousicího kotouče
L	[mm]	délka broušené plochy obrobku
Ra	[μm]	průměrná aritmetická úchylka povrchu
Rmax	[mm]	velký průměr referenční kružnice pro hodnocení kruhovitosti metodou MZC
Rmin	[mm]	malý průměr referenční kružnice pro hodnocení kruhovitosti metodou MZC
d	[mm]	malý průměr brousicího kotouče
h (v_p)	[mm.min ⁻¹]	přísuv
l	[mm]	délka pojezdu měřicího ramena
ln	[mm]	vyhodnocovaná délka drsnosti
lr	[mm]	základní délka pro profil drsnosti
n	[-]	počet hodnot
s	[-]	střední čára profilu drsnosti
t	[μm]	šířka tolerančního pole
v_k	[m.s ⁻¹]	obvodová rychlost brousicího kotouče
v_{ob}	[m.min ⁻¹]	obvodová rychlost obrobku
v_s	[mm.min ⁻¹]	podélný posuv
\bar{x}	[-]	aritmetický průměr

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Technický popis brusky BDU 80.
Příloha 2	Technický popis brusky BDU 250 A.
Příloha 3	Technický popis brusky BDA 300.
Příloha 4	Měřené hodnoty kruhovitosti a příčného profilu přístrojem Talyrond 3. Měřené kroužky byly obrobeny na brusce BDU 80.
Příloha 5	Měřené hodnoty kruhovitosti a příčného profilu přístrojem Talyrond 3. Měřené kroužky byly obrobeny na brusce BDU 250 A.
Příloha 6	Měřené hodnoty kruhovitosti a příčného profilu přístrojem Talyrond 3. Měřené kroužky byly obrobeny na brusce BDU 300.
Příloha 7	Tabulky pro přepočet naměřených hodnot na stupně přesnosti.

PŘÍLOHA 1

Technický popis brusky BDU 80 [6].

název	- Univerzální bruska na vnitřní broušení BDU 80
výrobce	- ČZ Strakonice
rok výroby	- 1986
minimální průměr broušeného otvoru	- 3 mm
maximální průměr broušeného otvoru	- 120 mm
maximální délka broušení	- 150 mm
maximální oběžný průměr	- 220 mm
oběžný průměr v podpěře	- 100 mm
maximální délka broušeného obrobku	- 450 mm
natačení unášecího vřeteníku	- 45°
maximální zdvih podélného stolu	- 550 mm
minimální délka oscilace	- 3 mm
otáčky unášecího vřetena	- 60, 90, 160, 280, 430, 740 min ⁻¹
otáčky vybrušovacích vřeten	- 10 000 – 60 000 min ⁻¹
posuv podélného stolu při broušení	- 0,1 – 5,5 m.min ⁻¹
přísuv brusného kotouče v úvrati při hrubování a dokonč. broušení	- 0,001 – 0,01 mm.Ø ⁻¹
elektrický příkon	- 8,5 kVA
hmotnost stroje	- 2600 kg
půdorysná plocha stroje	- 2630 x 1490 mm

PŘÍLOHA 2

Technický popis brusky BDU 250 A [7].

název	- Univerzální bruska na vnitřní broušení BDU 250 A
výrobce	- ČZM – OBOROVÝ PODNIK - Strakonice
rok výroby	- 1994
minimální průměr broušeného otvoru	- 10 mm
maximální průměr broušeného otvoru	- 250 mm
maximální délka broušení	- 250 mm
největší oběžný průměr	- 400 mm
největší oběžný průměr bez krytu a čelního broušení	- 470 mm
oběžný průměr v podpěře	- 150 mm
maximální zdvih podélného stolu	- 600 mm
průměr základní objímky pro vybrušovací vřetena	- 100 mm
otáčky unášecího vřetene	- 25, 45, 80, 140, 250, 450 min ⁻¹
otáčky vybrušovacích vřeten	- 4 600 – 31 000 min ⁻¹
posuv podélného stolu při broušení	- 0,2 – 6 m.min ⁻¹
posuv podélného stolu při orovnání	- 0,2 – 5 m.min ⁻¹
elektrický příkon	- 9 kVA
maximální délka broušeného obrobku dle délky nosníku	- 1000 nebo 600 nebo 250 mm
maximální váha obrobku	- 100 65 45 kg
natáčení unášecího vřeteníku	- 15° 90° 90°
hmotnost stroje cca	- 3600 3300 3250 kg

PŘÍLOHA 3

Technický popis brusky BDA 300 [8].

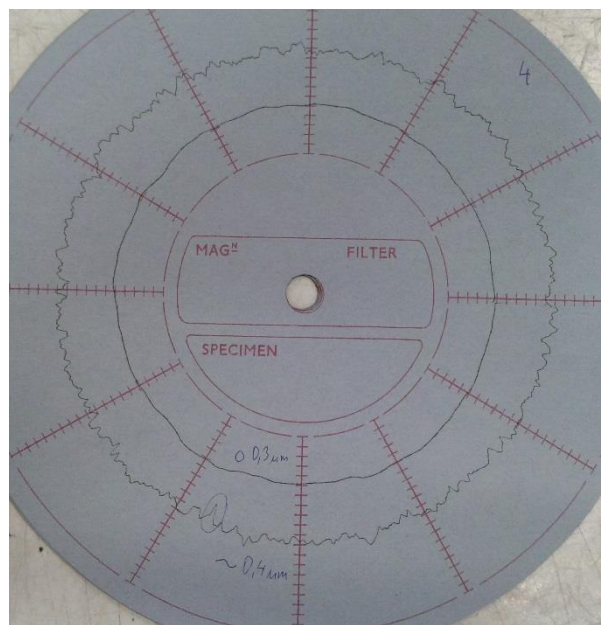
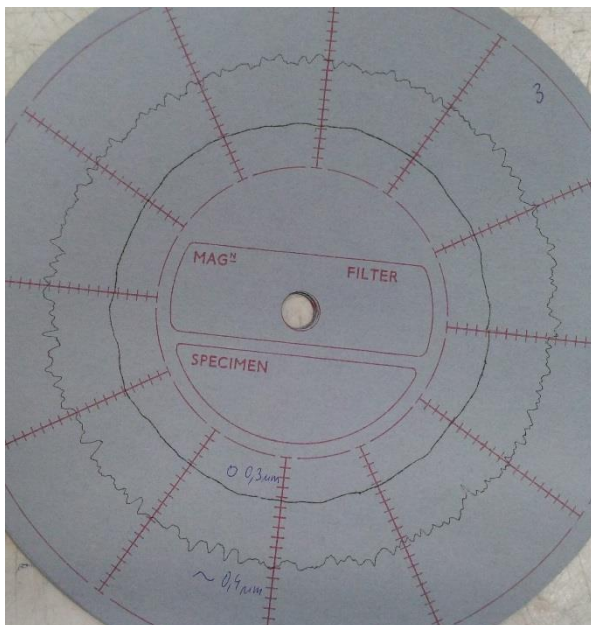
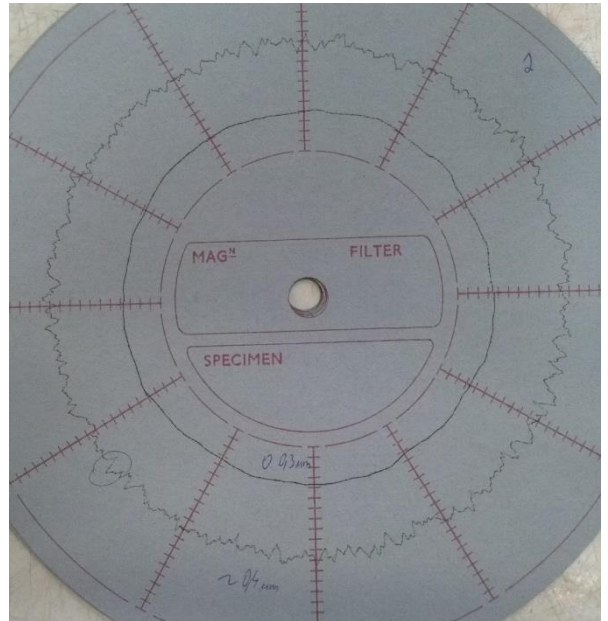
název	- bruska BDA 300 CNC
výrobce	- ČZ Strojírna spol. s r.o.
rok výroby	- 2003
vnitřní průměr broušení	- 30 - 350 mm
maximální délka broušení	- 250 mm
maximální oběžný průměr součásti	- 560 mm
maximální hmotnost obrobku	- 360 kg
otáčky pracovního vřetene	- 20 – 180 min ⁻¹
otáčky brousícího vřetene	- dle použitého vřetene
natočení pracovního vřeteníku	- (-2)° - 92°
zdvih podélné osy - Z	- 620 mm
zdvih příčné osy - X	- 250 mm
minimální krok v ose Z	- 0,0001 mm
minimální krok v ose X	- 0,0002 mm
instalovaný elektrický příkon	- cca 52,5 kVA
zastavěná plocha	- 21 m ²

PŘÍLOHA 4 (1/3)

Měřené hodnoty kruhovitosti a příčného profilu přístrojem Talyrond 3.

Měřené kroužky byly obrobeny na brusce BDU 80.

Výsledky měření kruhovitosti (vnitřní křivka) kroužků s pořadovými čísly 1 – 4.

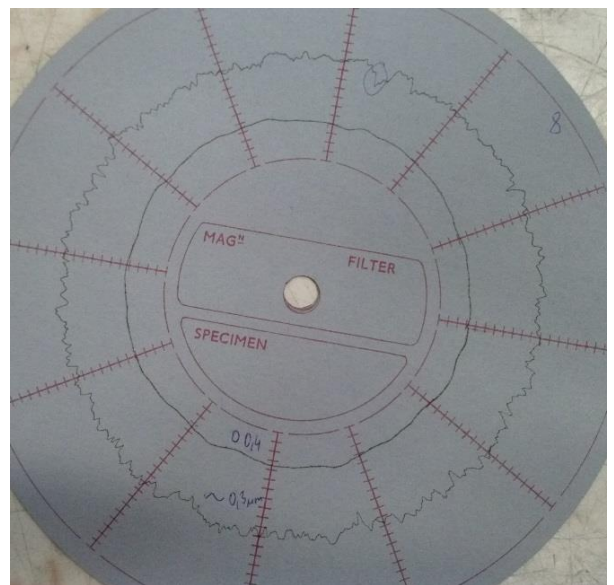
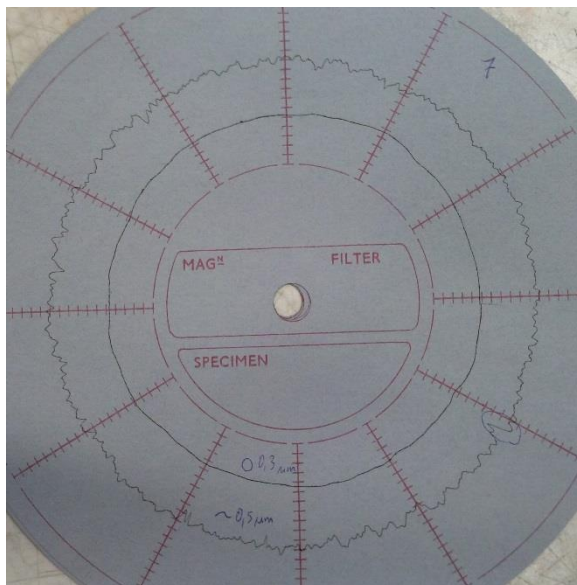
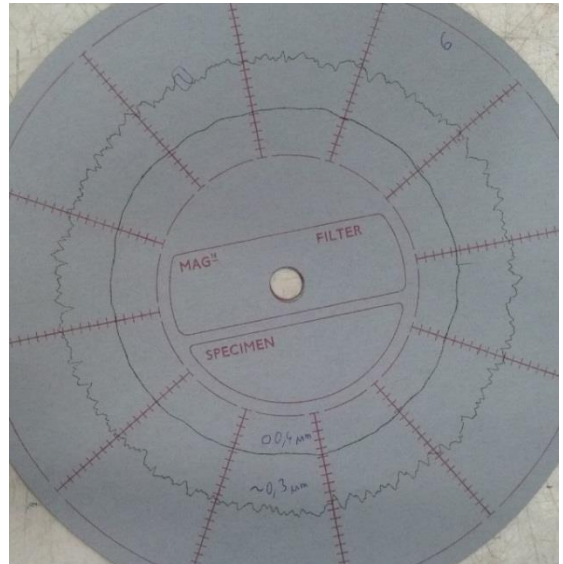


PŘÍLOHA 4 (2/3)

Měřené hodnoty kruhovitosti a příčného profilu přístrojem Talyrond 3.

Měřené kroužky byly obrobeny na brusce BDU 80.

Výsledky měření kruhovitosti (vnitřní křivka) kroužků s pořadovými čísly 5 – 8.

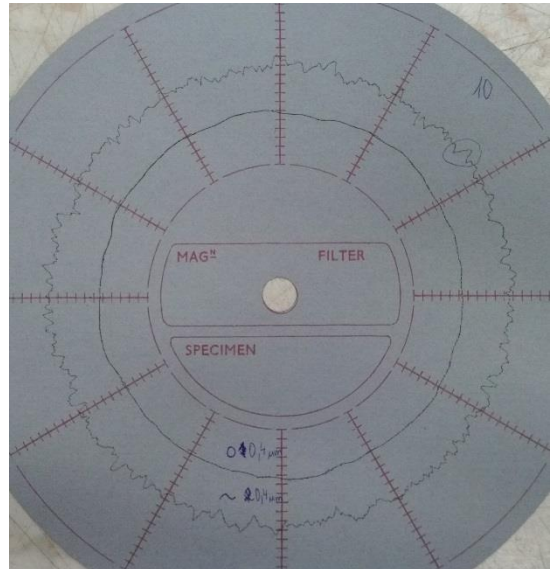


PŘÍLOHA 4 (3/3)

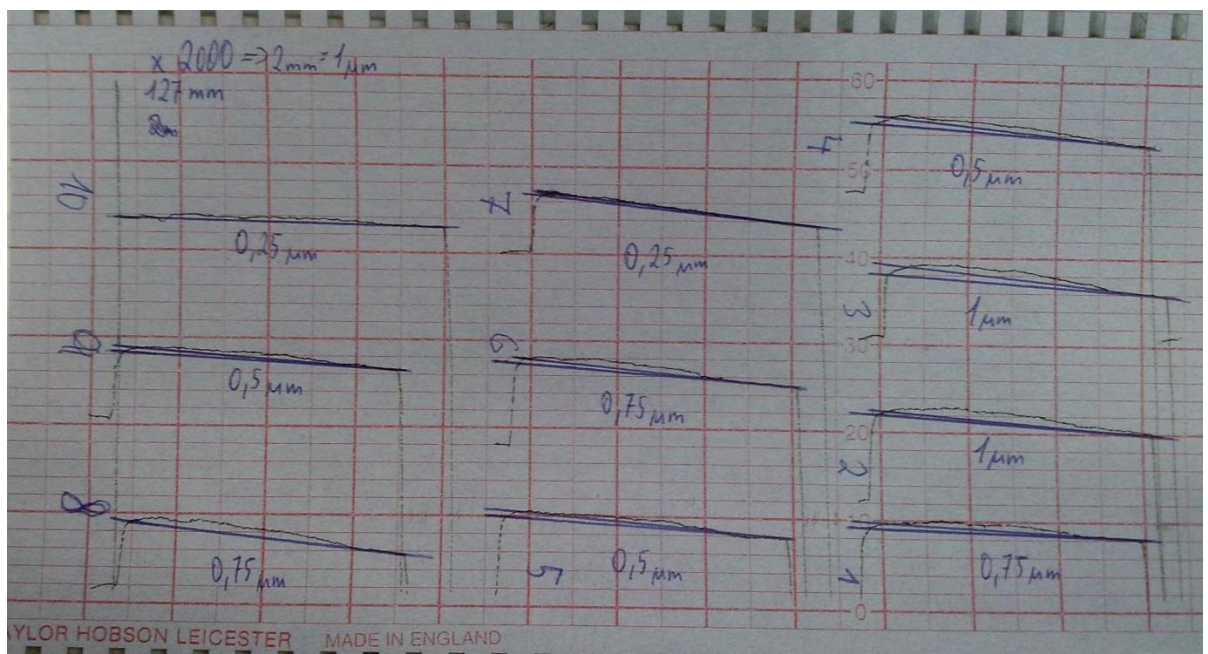
Měřené hodnoty kruhovitosti a příčného profilu přístrojem Talyrond 3.

Měřené kroužky byly obrobeny na brusce BDU 80.

Výsledky měření kruhovitosti (vnitřní křivka) kroužků s pořadovými čísly 9 a 10.



Výsledky měření příčného profilu kroužků s pořadovými čísly 1 – 10.

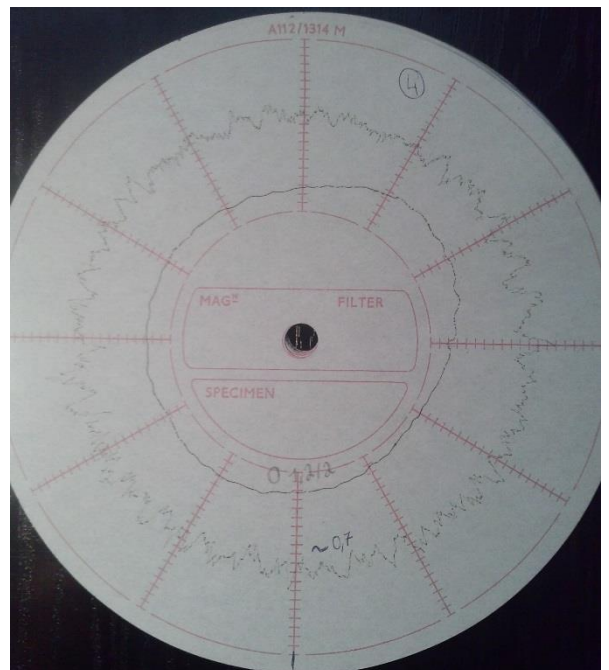
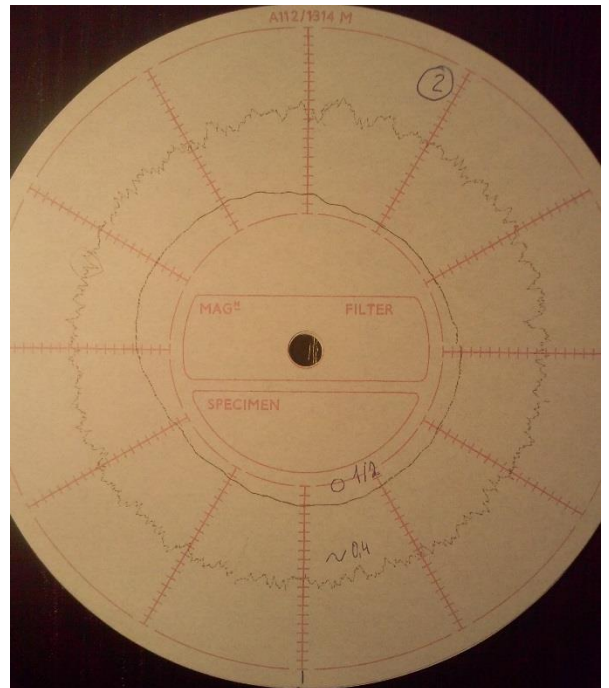
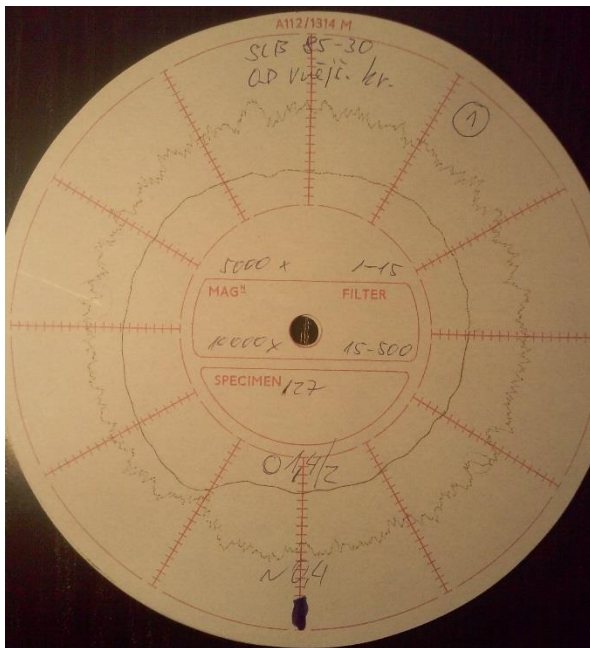


PŘÍLOHA 5 (1/3)

Měřené hodnoty kruhovitosti a příčného profilu přístrojem Talyrond 3.

Měřené kroužky byly obrobeny na brusce BDU 250 A.

Výsledky měření kruhovitosti (vnitřní křivka) kroužků s pořadovými čísly 1 – 4.

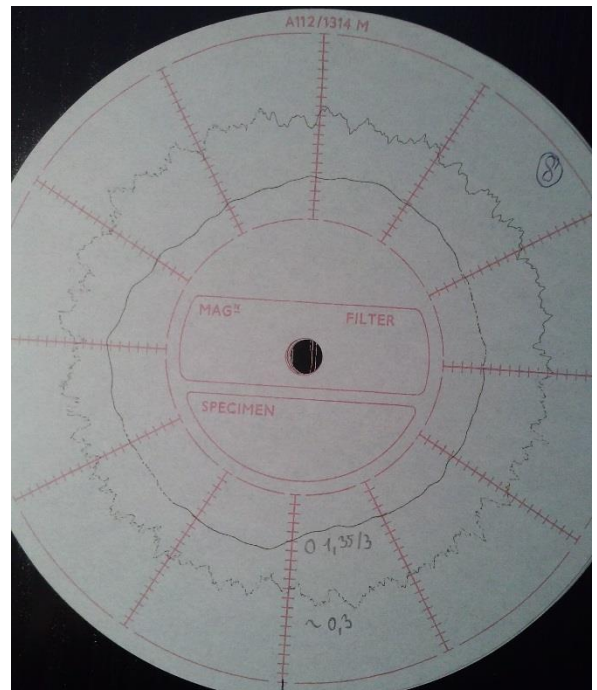
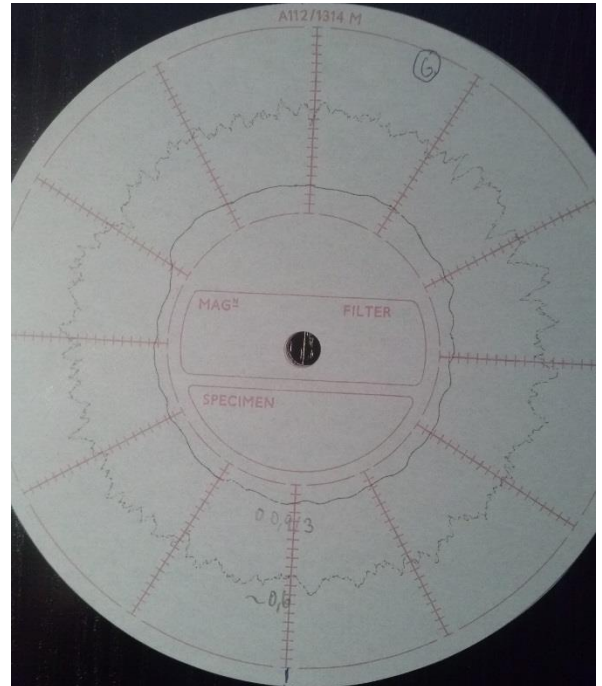


PŘÍLOHA 5 (2/3)

Měřené hodnoty kruhovitosti a příčného profilu přístrojem Talyrond 3.

Měřené kroužky byly obrobeny na brusce BDU 250 A.

Výsledky měření kruhovitosti(vnitřní křivka) kroužků s pořadovými čísly 5 – 8.



PŘÍLOHA 5 (3/3)

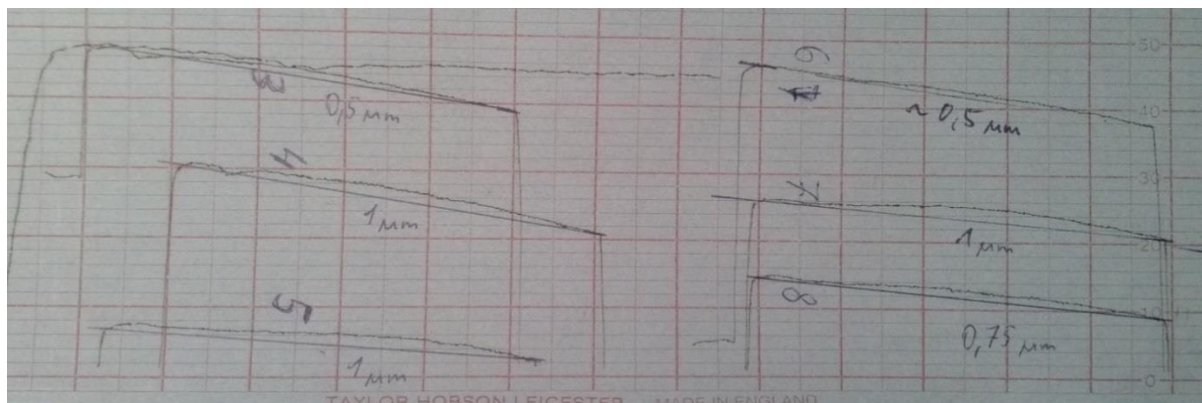
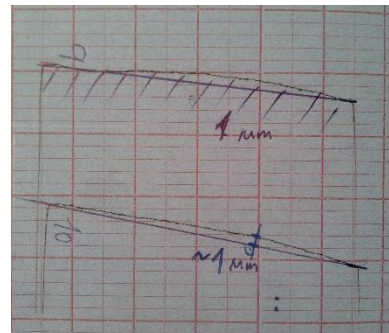
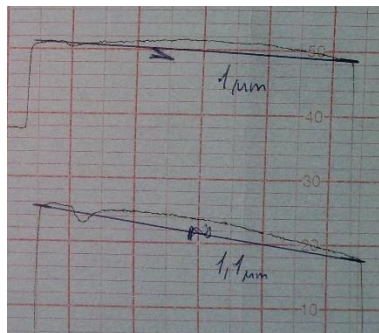
Měřené hodnoty kruhovitosti a příčného profilu přístrojem Talyrond 3.

Měřené kroužky byly obrobeny na brusce BDU 250 A.

Výsledky měření kruhovitosti (vnitřní křivka) kroužků s pořadovými čísly 9 a 10.



Výsledky měření příčného profilu kroužků s pořadovými čísly 1 – 10.

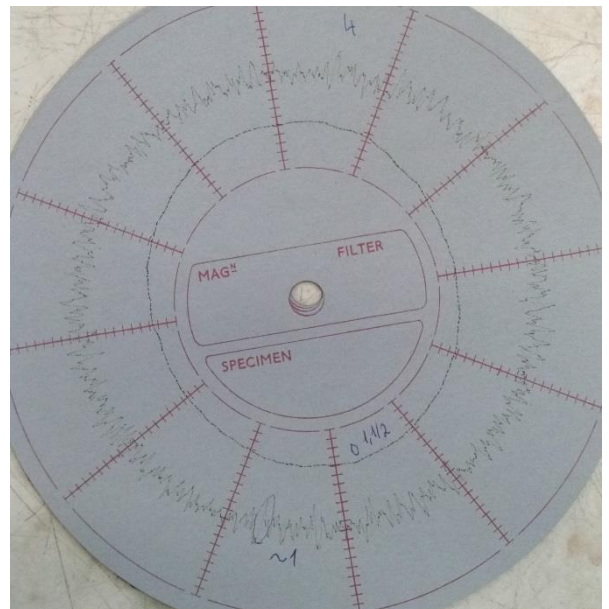
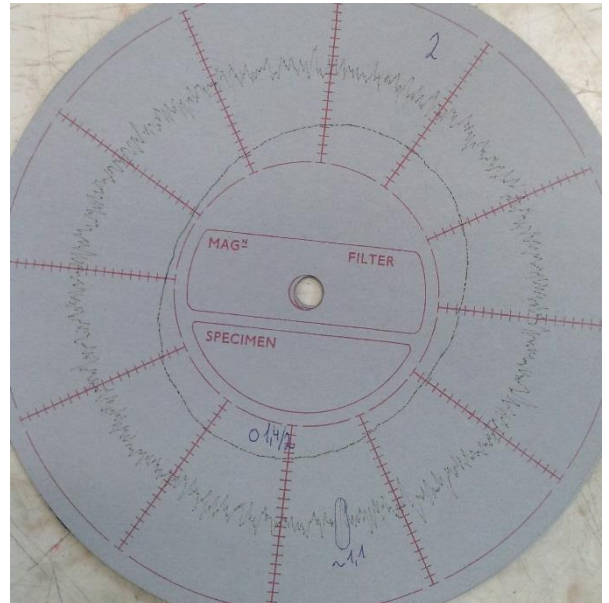
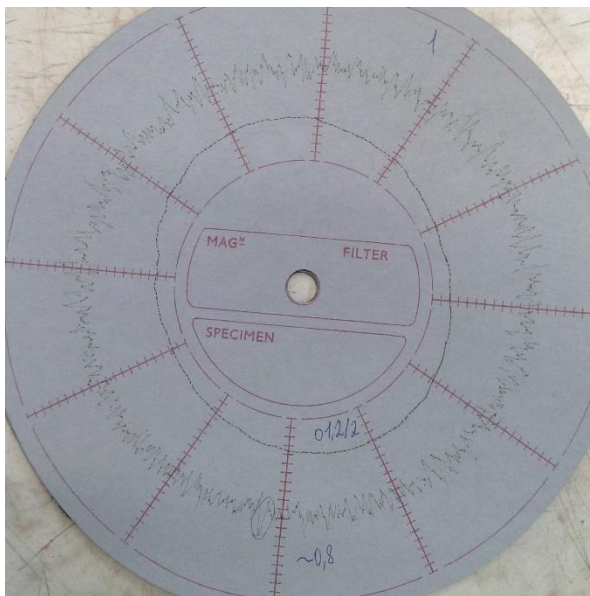


PŘÍLOHA 6 (1/3)

Měřené hodnoty kruhovitosti a příčného profilu přístrojem Talyrond 3.

Měřené kroužky byly obrobeny na brusce BDA 300.

Výsledky měření kruhovitosti (vnitřní křivka) kroužků s pořadovými čísly 1 – 4.

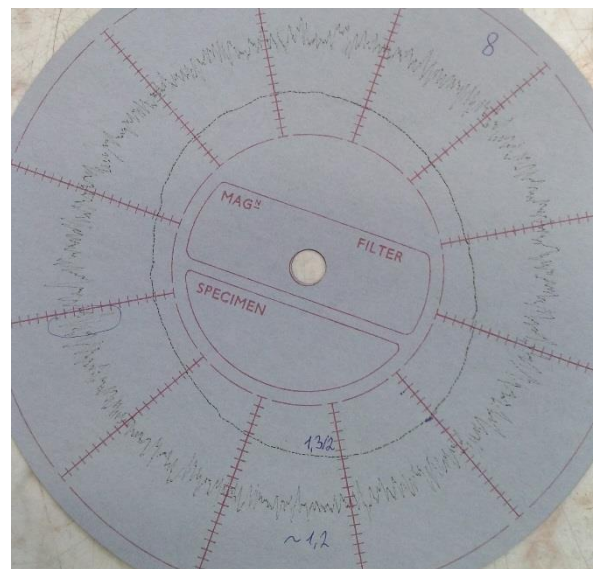
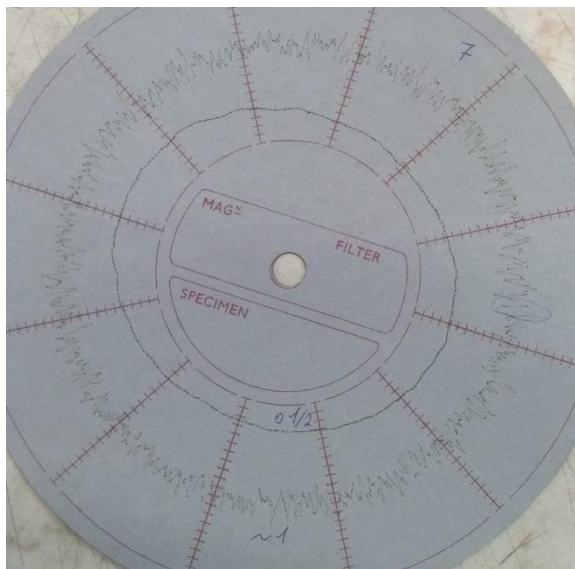
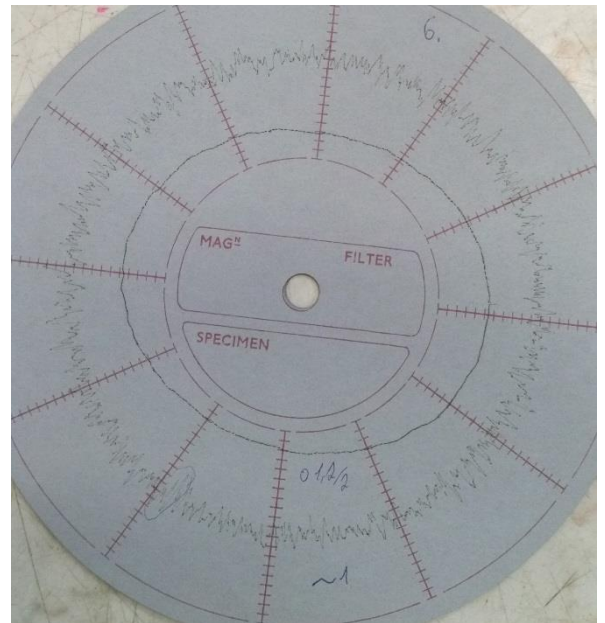


PŘÍLOHA 6 (2/3)

Měřené hodnoty kruhovitosti a příčného profilu přístrojem Talyrond 3.

Měřené kroužky byly obrobeny na brusce BDA 300.

Výsledky měření kruhovitosti (vnitřní křivka) kroužků s pořadovými čísly 5 – 8.

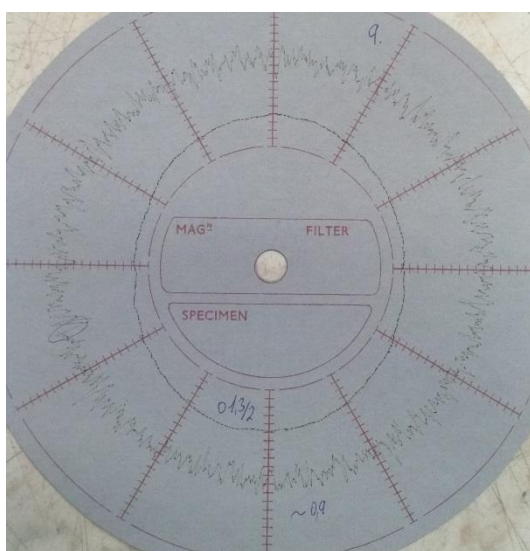


PŘÍLOHA 6 (3/3)

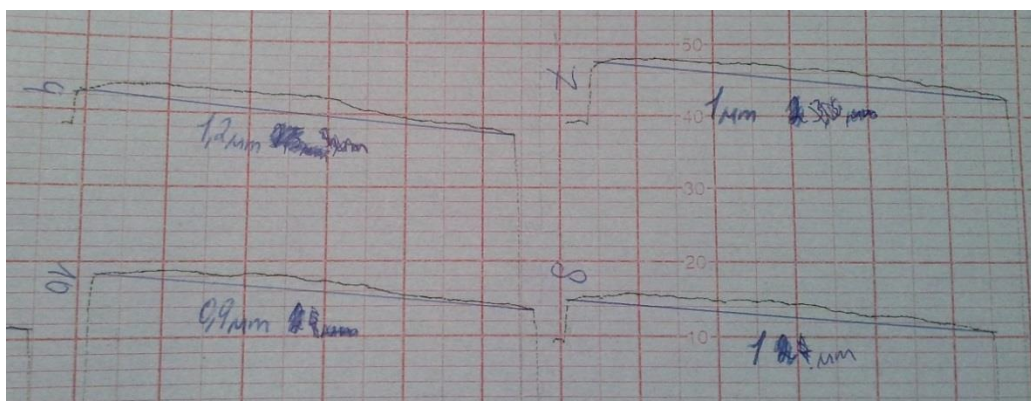
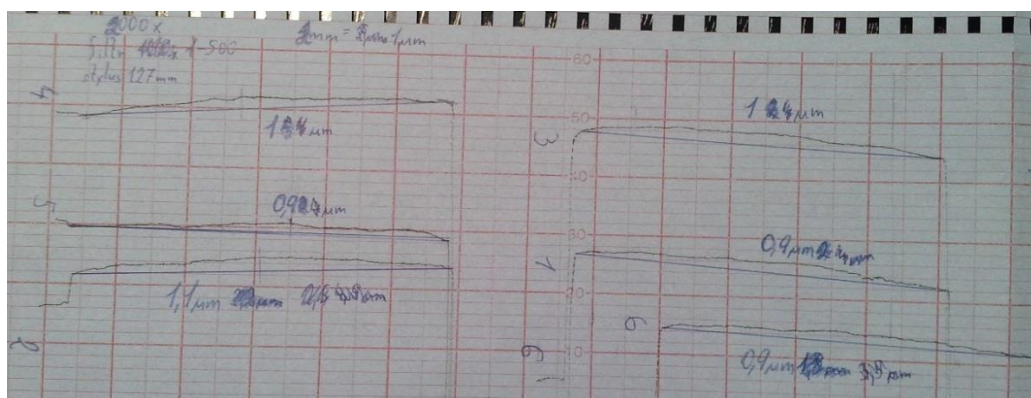
Měřené hodnoty kruhovitosti a příčného profilu přístrojem Talyrond 3.

Měřené kroužky byly obrobeny na brusce BDA 300.

Výsledky měření kruhovitosti (vnitřní křivka) kroužků s pořadovými čísly 9 a 10.



Výsledky měření příčného profilu kroužků s pořadovými čísly 1 – 10.



PŘÍLOHA 7 (1/3)

Tabulky pro přepočet naměřených hodnot na stupně přesnosti.

Tolerance kruhovitosti a válcovitosti (výběr) [12, 14].

Rozsahy jmenovitých rozměrů v mm		Stupeň geometrické přesnosti													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
přes	do	μm												mm	
	3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	12	20	30	50	0,08	0,12
3	10	0,4	0,6	1	1,6	2,5	4	6	10	16	25	40	60	0,1	0,16
10	18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	12	20	30	50	80	0,12	0,2
18	30	0,6	1	1,6	2,5	4	6	10	16	25	40	60	100	0,16	0,25
30	50	0,8	1,2	2	3	5	8	12	20	30	50	80	120	0,2	0,3
50	120	1	1,6	2,5	4	6	10	16	25	40	60	100	160	0,25	0,4
120	250	1,2	2	3	5	8	12	20	30	50	80	120	200	0,3	0,5
250	400	1,6	2,5	4	6	10	16	25	40	60	100	160	250	0,4	0,6
400	630	2	3	5	8	12	20	30	50	80	120	200	300	0,5	0,8

Tolerance přímosti a rovinnosti (výběr) [12, 14].

Rozsahy jmenovitých rozměrů v mm		Stupeň geometrické přesnosti													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
přes	do	μm												mm	
	10	0,25	0,4	0,6	1	1,6	2,5	4	6	10	16	25	40	0,06	0,1
10	16	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	12	20	30	50	0,08	0,12
16	25	0,4	0,6	1	1,6	2,5	4	6	10	16	25	40	60	0,1	0,16
25	40	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	12	20	30	50	80	0,12	0,2
40	63	0,6	1	1,6	2,5	4	6	10	16	25	40	60	100	0,16	0,25
63	100	0,8	1,2	2	3	5	8	12	20	30	50	80	120	0,2	0,3
100	160	1	1,6	2,5	4	6	10	16	25	40	60	100	160	0,25	0,4
160	250	1,2	2	3	5	8	12	20	30	50	80	120	200	0,3	0,5
250	400	1,6	2,5	4	6	10	16	25	40	60	100	160	250	0,4	0,6

PŘÍLOHA 7 (2/3)

Tabulky pro přepočet naměřených hodnot na stupně přesnosti.

Soustava tolerancí a uložení ISO – základní tolerance [13, 14].

Jmenovité rozměry v mm		Toleranční stupně									
		IT 01	IT 0	IT 1	IT 2	IT 3	IT 4	IT 5	IT 6	IT 7	IT 8
		Podle zvláštních vztahů						7 i	10 i	16 i	25 i
přes	do	Číselné hodnoty základních tolerancí ISO									
		μm									
	3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14
3	6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18
6	10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22
10	18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27
18	30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33
30	50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39
50	80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46
80	120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54
120	180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63
180	250	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72
250	315	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81
315	400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89
400	500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97

Jmenovité rozměry v mm		Toleranční stupně									
		IT 9	IT 10	IT 11	IT 12	IT 13	IT 14	IT 15	IT 16	IT 17	IT 18
		40 i	64 i	100 i	160 i	250 i	400 i	640 i	1000 i	1600 i	2500 i
přes	do	Číselné hodnoty základních tolerancí ISO									
		μm					mm				
	3	25	40	60	0,10	0,14	0,25	0,40	0,60	1,00	1,40
3	6	30	48	75	0,12	0,18	0,30	0,48	0,75	1,20	1,80
6	10	36	58	90	0,15	0,22	0,36	0,58	0,90	1,50	2,20
10	18	43	70	110	0,18	0,27	0,43	0,70	1,10	1,80	2,70
18	30	52	84	130	0,21	0,33	0,52	0,84	1,30	2,10	3,30
30	50	62	100	160	0,25	0,39	0,62	1,00	1,60	2,50	3,90
50	80	74	120	190	0,30	0,46	0,74	1,20	1,90	3,00	4,60
80	120	87	140	220	0,35	0,54	0,87	1,40	2,20	3,50	5,40
120	180	100	160	250	0,40	0,63	1,00	1,60	2,50	4,00	6,30
180	250	115	185	290	0,46	0,72	1,15	1,85	2,90	4,60	7,20
250	315	130	210	320	0,52	0,81	1,30	2,10	3,20	5,20	8,10
315	400	140	230	360	0,57	0,89	1,40	2,30	3,60	5,70	8,90
400	500	155	250	400	0,63	0,97	1,55	2,50	4,00	6,30	9,70

PŘÍLOHA 7 (3/3)

Tabulky pro přepočet naměřených hodnot na stupně přesnosti.

Závislost mezi rozměrovou tolerancí a hodnotou Ra (autorem vytvořená tabulka na základě tabulky uvedené v normě ČSN 01 4451) [17, 18].

Rozsah rozměrů v mm		Toleranční stupeň							
		IT 1	IT 2	IT 3	IT 4	IT 5	IT 6		
přes	do	Hodnota Ra v μm							
	3	0,025	0,05	0,1	0,1	0,2	0,4		
3	6	0,05			0,1			0,2	0,4
6	10		0,1	0,2		0,4	0,8		
10	18								
18	30	0,4			0,8			1,6	
30	50		0,8	1,6					
50	80					1,6			
80	120								
120	180								
180	250								